AEROSTACION Y CIENCIA • HIELOS INFLAMABLES • LA VISION, VENTANA DE LA CONCIENCIA





Febrero de 2000 Número 281

SECCIONES

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



Portada: Digital Art by Space Channel/Philip Saunders

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4-5	NASA
6	Don Foley
7	Jana Brenning (*arriba*); cortesía de Raven Industries, Inc. (*abajo*)
8-9	Don Foley
10-11	Cortesía de Zeppelin Luftschifftechnik
12-13	Lee Dunnette (*izquierda*); cortesía de ZF FRIEDRICHSHAFEN AG (*fotografías*)
14	Hepburn Walker
15	Cortesía de ZF FRIEDRICHSHAFEN AG
16-17	AP KEYSTONE
18	Don Foley
19	Lee Dunnette
30-31	Roger Sassen
32	Fotografías cortesía del Centro de Investigación de Geociencias Marinas (GEOMAR)
33	Slim Films (*ilustraciones*); cortesía de GEOMAR (*fotografías*)
34	GEOMAR
35	Laurie Grace
36	Rick Jones
38-39	Slim Films; fuente: Fred C. Adams y Gregory Laughlin; Lawrence M. Krauss y Glenn D. Starkman; Mark Clemens (*línea del tiempo*)
40	Don Dixon y George Musser
41	Laurie Grace y George Musser
43	Don Dixon y George Musser
44-45	Laurie Grace y George Musser
46-47	Museo Salvador Dalí, San Petersburgo, Florida, EE.UU.
48	Johnny Johnson
49	Dan Wagner
50	Terese Winslow con la colaboración de Nouchine Hadjikhani y Roger Tootell
51	Nikos K. Logothetis
52-53	Matt Collins
54-55	Roberto Osti
56-57	Cortesía de Howard Topoff (*izquierda y derecha*); Raymond A. Mendez (*centro*)
58	Tom Moore
59	Cortesía de Howard Topoff (*arriba izquierda y derecha*); Raymond A. Mendez (*abajo*)
60	Raymond A. Mendez
62-68	Josep Campmany, Joan Bordas y Ramón Pascual
70-71	Karen Kasmauski *Matrix*
72-73	Salahuddin Azizee (fotografías); Lisa Burnett (gráficas)
74-75	Salahuddin Azizee (*a*, *b* y *c*); Karen Kasmauski (*d*); Lisa Burnett (*e*)
77	Dusan Petricic
78	Sarah L. Donelson
79	Vo Trung Dung (*arriba*); Sarah L. Donelson (*abajo*)
80	Sarah L. Donelson
81	Alfred T. Kamajian (*arriba y abajo*); Laurie Grace (*inserto*)
82	Alfred T. Kamajian
83	Vo Trung Dung

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Manuel Puigcerver: *Flotando en el espacio*; Juan Pedro Adrados: *Un zepelín para el siglo XXI y El globo que dio la vuelta al mundo*; Sònia Ambròs: *Hielo inflamable*; A. Garcimartín: *El sino de la vida en el universo* y *Perfiles*; Xavier Bellés: *Reinas que capturan esclavas*; Juan P. Campos: *Acústica de tiempo invertido*; Luis Bou: *El banco Grameen y Juegos matemáticos*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*; Ricki L. Rusting, *Senior Associate Editor*; Timothy M. Beardsley y Gary Stix, *Associate Editors*; W. Wayt Gibbs, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler, *On-Line Editor*; Mark Alpert, Carol Ezzell, Alden M. Hayashi, Steve Mirsky, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Sarah Simpson y Glenn Zorpette, *Editors;* Graham P. Collins; Marguerite Holloway y Paul Wallich, *Contributing Editors*
PRODUCTION William Sherman
CHAIRMAN Rolf Grisebach
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Joachim P. Rosler

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta.	16.000 pta.
	52,89 euro	96,16 euro
Extranjero	11.500 pta.	21.500 pta.
	69,12 euro	129,22 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

UNA ARDOROSA CONTROVERSIA. «Entre los genéticos estadounidenses, Tracy M. Sonneborn destaca como aquel cuyos trabajos parecen respaldar la teoría de la herencia de los caracteres adquiridos, de la que es paladín el biólogo soviético Trofim D. Lysenko. Sonneborn ha demostrado que existen dos tipos de paramecios unicelulares, cada uno de los cuales puede transformarse en el otro merced a factores ambientales, tales como el calor o la limitación de nutrientes. Esa transformación es hereditaria, aunque pasa de una generación a otra no mediante los genes del núcleo celular sino mediante los 'plasmagenes' existentes en el citoplasma que rodea al núcleo. Sonneborn declara, no obstante, que los lysenkoístas que se han apropiado de sus conclusiones para reafirmar su postura las han interpretado erróneamente.»

COMPUTADORAS JUGADORAS DE AJEDREZ. «¿Podría concebirse una máquina 'que piense'? Alguna posibilidad la ilustra una computadora preparada para jugar al ajedrez. Bajo determinadas condiciones la máquina podría vencer al creador del programa. Pero si éste se enfada podría rebajar las habilidades de la máquina sin más que cambiar el programa. De la máquina, su principal punto flaco es que no aprende de sus errores. —Claude E. Shannon» [*Nota de la Redacción: A Shannon se le considera fundador de la teoría de la información.*]



Computadora que juega al ajedrez

...cien años

LOS PRIMEROS PREMIOS NOBEL. «La Academia sueca de Ciencias está considerando, en Estocolmo, los candidatos a recibir los primeros Nobel al mérito por el progreso científico. Entre los nombres ya propuestos figuran el profesor Roentgen, Marconi, el barón Nordenskjöld y Henri Dunant, fundador de la Sociedad de la Cruz Roja.» [*Nota de la Redacción: Roentgen y Dunant fueron premiados en 1901 y Marconi en 1909. Nordenskjöld murió en 1901.*]

ARROCERAS MECÁNICAS. «En 1898 los Estados Unidos produjeron menos de la mitad del arroz que consumen. El arroz, su naturaleza subtropical aparte, es una cosecha que se da fundamentalmente en tierras húmedas, por lo que hasta ahora no podían intervenir máquinas recolectoras. Debía segarse con gran esfuerzo empleando hoces. Pero en 1884 unos emprendedores colonos de Luisiana acometieron el desarrollo de un nuevo sistema de cultivo arrocero. Ya perfeccionado, el método consiste en inundar una pradera seca mediante un sistema de bombas, canales y diques y avenar el agua cuando el arroz está a punto de madurar, dejando la tierra lo bastante seca para que puedan actuar las segadoras. Gracias a este sistema, la industria ha experimentado un rápido desarrollo.»

MÁS RÁPIDO, MÁS BARATO. «El Departamento de Trabajo de EE.UU. ha estado investigando los efectos de la sustitución de la mano de obra por las máquinas en el ramo metalúrgico. Se ha visto que en 1857 un cañón de fusil necesitaba 98 horas de trabajo manual. Actualmente se hace en 3 horas y 40 minutos.»

REMEDIO PARA LA RUINA MORAL. «El doctor John D. Quackenbos, de la Universidad de Columbia, lleva tiempo realizando experimentos sobre el empleo de la sugestión hipnótica para corregir la cleptomanía, el alcoholismo, los hábitos infantiles de mentir o pequeños hurtos y otras tachas morales. Explica el doctor Quackenbos: 'Averiguo cuanto puedo acerca de la radicación de la enfermedad en el paciente. En cada uno he de descubrirle alguna ambición, alguna tendencia consciente a la que recurrir y, entonces, mi sugestión, como impulso inconsciente, controla la flaqueza moral induciendo al paciente a colmar sus deseos por medios lícitos. Pero si, como me ha ocurrido, hay quien no tiene otra ilusión que la de ser un buen jugador de billar no podré curarle de su hábito de beber, pues su máxima ambición es precisamente lo que le pone en peligro.'»

...ciento cincuenta años

BOCIO. «Monsieur Grange leyó ante la Academia de Ciencias de París un documento acerca de una terrible enfermedad de los valles suizos llamada bocio. La atribuyó a la presencia de magnesio en las aguas; puede remediarse mediante pequeñas dosis de sales de yodo.»

LOS INSECTOS SEGÚN AGASSIZ. «En una reciente conferencia, el afamado profesor Agassiz afirmó que haría falta más de una vida para enumerar y describir las especies de insectos. Los museos europeos recogen infinidad de ellas, de las que se desconocen casi por completo sus hábitos y metamorfosis. El alemán Meiger, que dedicó toda su vida al estudio, coleccionó y describió seis mil especies de moscas, recogidas por él en una región de unos quince kilómetros de perímetro, aunque de sus costumbres apenas sabía nada.»

CÁLIDA ACOGIDA. «La ballena que la semana pasada hizo un viaje de placer a la bahía de Provincetown fue muy inhóspitamente tratada por los lugareños, que la arponearon y trincharon en menos de una hora. Produjo unos cincuenta barriles de aceite.»

Flotando en el espacio



En los globos tenemos un medio barato y de respuesta pronta para el estudio de la atmósfera, la terrestre y la de otros planetas

Steve Smith, Jr., y James A. Cutts

Aun perro viejo no se le pueden enseñar nuevas mañas. Eso dicen. Pero no debe predicarse del primer vehículo volador salido de mano del hombre. Científicos e ingenieros de la NASA están revolucionando el tamaño, forma, duración y resistencia del globo. Todo, en una palabra. Más de dos siglos llevan ya los aerostatos surcando los aires, cumpliendo múltiples misiones de investigación. Pero el tiempo de permanencia en vuelo ha constituido siempre un factor limitante. O constituía. Merced a programas informáticos depurados, materiales de técnica avanzada y diseños exclusivos, los globos de largo alcance están a punto de abrir una nueva etapa en la investigación a grandes altitudes e incluso en la exploración del cosmos. En una época de estrechez presupuestaria, la administración anima a los expertos para que busquen formas innovadoras en aerostación científica.

La investigación centrada en las regiones más altas de la atmósfera terrestre, prepara globos capaces de permanecer en vuelo 100 días por lo menos. En el Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA en Maryland se trabaja en un globo enorme, con forma de calabaza, cuyo despegue está previsto para diciembre del año 2001. El artefacto se elevará desde Australia o Nueva Zelanda y flotará durante varios meses en el límite de la atmósfera terrestre, cuatro veces más alto que los aviones de pasajeros. El globo estará conectado a Internet mediante satélite y una estación en tierra. De ese modo, los científicos tendrán acceso a los datos suministrados por los instrumentos a bordo; entre ellos, un registrador de elementos galácticos transférricos (TIGER), que mide las cantidades de elementos contenidas en los rayos cósmicos galácticos.

En el proyecto del Globo de Duración Ultra-Larga (ULDB) confían quienes consideran que la técnica aerostática es un medio económico de estudiar la atmósfera superior y el espacio exterior. Por una fracción mínima de lo que cuesta elevar un cohete se alza un globo; además, podemos recuperar, reparar y elevar de nuevo los instrumentos que porta. Los globos científicos han alcanzado alturas de 52 kilómetros y transportado cargas útiles de hasta 3600 kilogramos. Con la posibilidad de alcanzar el límite de la estratosfera, donde la interferencia atmosférica es virtualmente nula, llegará el día en que los ULDB transporten un telescopio que le dispute al *Hubble* su capacidad para explorar el universo, un telescopio demasiado grande para ponerlo en órbita un cohete.

Los globos transportados por cohete pueden también extender la ciencia allende la atmósfera terrestre para adentrarse en las capas que rodean a otros planetas y sus satélites. En ellos se piensa para abordar su química y dinámica atmosféricas, la construcción de mapas paleomagnéticos, el reconocimiento geológico y la construcción de imágenes de muy alta resolución.

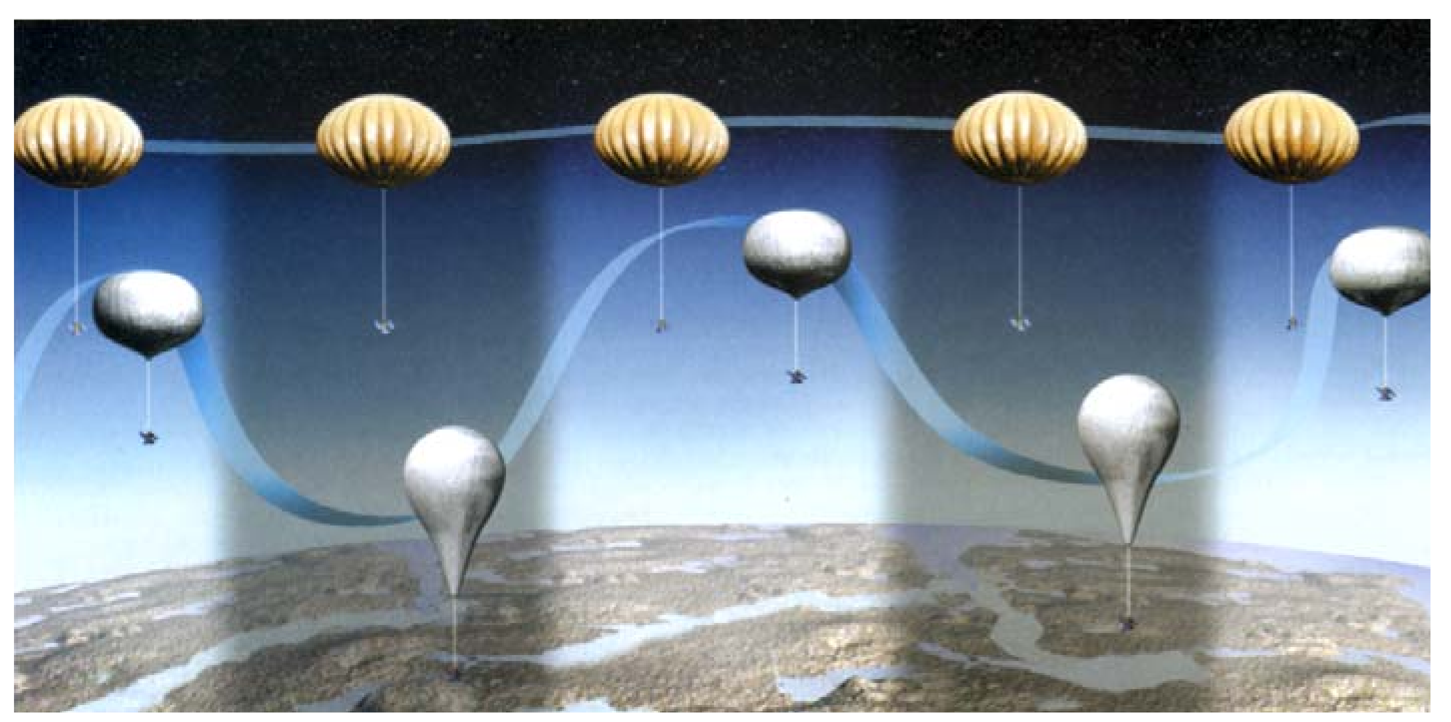
1. EL GLOBO DE DURACION ULTRA-LARGA, que puede flotar en los confines superiores de la estratosfera durante un período de hasta 100 días, permitirá contemplar el universo a un coste muy inferior al de los vehículos espaciales.

Flotando sobre la Tierra

Arquímedes descubrió, en el año 240 a.C., el principio de flotación. Aunque en él se funda el vuelo de los globos, hasta finales del siglo XVIII no se puso en práctica. La aplicación científica comenzó en las postrimerías de la centuria siguiente, en que los primeros estudios de la atmósfera se sirven del aerostato para medir la temperatura y la humedad. En su aplicación militar, llegada con la guerra civil norteamericana, el globo constituía una privilegiada plataforma para observar el movimiento de tropas. A finales del decenio de 1940 y principios del siguiente, un prototipo de la Marina de los Estados Unidos compuesto de poliestireno inauguró la aerostática de los tiempos modernos. Con esa hechura el globo alcanzaría la estratosfera, una altura entre 15 y 50 kilómetros, transportaría mayores pesos y permanecería en vuelo durante más tiempo. Las misiones con globos tripulados facilitaron los programas espaciales tripulados, pues permitieron someter a prueba trajes espaciales y calibrar la respuesta humana ante un medio exterior casi espacial. En 1960, un cohete de la NASA lanzó el primer globo-satélite experimental de comunicaciones, el *Echo I*; pasó algo menos de ocho años en órbita alrededor de la Tierra, a una altitud aproximada de 1600 kilómetros. Veinticinco años más tarde, un grupo internacional encabezado por la Unión Soviética, y que incluía a Francia y los Estados Unidos, construyó y lanzó con éxito dos globos hasta las nubes de Venus, a unos 54 kilómetros por encima de su superficie.

Aparte de la limitada capacidad de carga de las naves espaciales (sólo el transbordador espacial iguala la de los grandes globos), tienen éstas una desventaja adicional: se tarda años en preparar sus sensores para el vuelo. En 1987, los sensores transportados en globo observaron, a los tres meses de su descubrimiento, la Supernova 1987A; este tipo de explosión estelar se produce una cada 400 años. Ello explica que muchos de los instrumentos transportados por naves espaciales se basen en técnicas contrastadas y puestas a punto en misiones aerostáticas.

Los globos científicos se dividen en dos clases: de presión diferencial nula y de sobrepresión. La mayoría de los globos de la flota de la NASA pertenecen al primer tipo. Un globo a presión nula se eleva del suelo si está lleno de helio suficiente para compensar su peso total, carga útil incluida. Para que el globo suba, el helio debe proporcionar "fuerza ascensional", expresión que en jerga aerostática designa la diferencia positiva entre el empuje vertical hacia arriba y el peso total del globo y la carga útil. (La fuerza ascensional está determinada por el principio de Arquímedes, que establece que un objeto sumergido en un fluido experimenta un empuje vertical hacia arriba igual al peso del volumen de fluido desalojado.) A medida que el globo asciende, la densidad atmosférica disminuye y el volumen del gas contenido en su interior se ex-



2. UN GLOBO A SOBREPRESION (*naranja*) está fabricado de tejido resistente que puede soportar y mantener una diferencia de presión entre el interior y el exterior. Como resultado, el globo conserva su volumen constante y, según el principio de Arquímedes, permanece a la misma altura. Los globos más antiguos, a sobrepresión nula, se dilatan durante el día con el calor solar y se contraen de noche; en razón de ese fenómeno, cambian constantemente de altitud. Para controlar la altitud se arroja lastre; por eso, su vida útil está limitada por la cantidad del mismo que puedan acarrear.

pande hasta que la envoltura queda llena. En ese momento, las presiones en el interior y en el exterior de la envoltura del globo son iguales (de donde "presión diferencial nula"), pero el globo flota porque su peso es inferior al del aire desplazado. Una vez alcanzada la altura deseada de 36 o 40 kilómetros, lo que transcurre en dos o tres horas, las válvulas que hay en la base del globo dejan escapar el exceso de gas para mantener el aerostato a ese nivel y evitar que se desgarre la fina envoltura de polietileno. Como el globo deja escapar a la atmósfera parte del gas almacenado, se dice que este modelo a presión diferencial nula está "abierto" a la atmósfera.

Durante el día, el globo suelta gas cuando el sol lo calienta. Al acercarse la noche, desaparece el calentamiento solar, el gas se enfría, el volumen del globo se contrae y éste empieza a descender. Para mantener la altitud se arroja lastre, que generalmente representa entre el 7 y el 10 por ciento de la masa total del sistema. Al día siguiente se repite el proceso de calentamiento y enfriamiento; en resumen, el número de días que un globo puede permanecer en el aire depende de la cantidad de lastre que transporte.

Por durar sólo uno o dos días los vuelos de globos científicos, se requieren numerosos viajes para llevar a término un experimento. Para soslayar tamaño inconveniente se realizan los vuelos en la proximidad de las regiones polares, en perpetua noche o en perpetuo día. La NASA lleva a cabo cierto número de vuelos desde Fairbanks, en Alaska, y desde la base McMurdo, en la Antártida, donde la luz diurna constante durante el verano permite a los globos estar en el aire dos o tres semanas.

Una vez completado un experimento, se ordena por radio la separación del globo de su carga útil, que desciende en paracaídas hasta la Tierra, se recupera y, con frecuencia, se vuelve a usar de nuevo. El globo también cae a tierra y se desecha.

Más tiempo de vuelo

Los vuelos de mayor duración y los viajes interplanetarios requieren globos con prestaciones muy diferentes y mejores. El objetivo del proyecto del Globo de Duración Ultra-Larga (ULDB), iniciado en 1997 por la Oficina de Ciencia Espacial de la NASA y dirigido por la Instalación Wallops del Centro de Vuelos Espaciales Goddard, es construir un globo que pueda volar hasta 100 días por encima del 99 por ciento de la atmósfera terrestre. El ULDB es un globo a sobrepresión, o "cerrado", que no expulsa gas a la atmósfera como los globos tradicionales. Fabricados a partir de materiales más resistentes, como el poliéster, los globos a sobrepresión se inflan de la misma manera que sus homólogos a presión diferencial nula, pero luego se cierran herméticamente. Una vez que el globo a sobrepresión alcanza la altura deseada, el calentamiento solar incrementa la presión interior hasta exceder la presión exterior. Aumenta así la diferencia de presión entre el interior y el exterior. Por la noche, cuando el gas se enfría, esta diferencia de presión disminuye; si se ha introducido suficiente gas en el globo, la presión diferencial no puede caer bajo cero. De esta manera, el globo continúa lleno y a una altitud constante sin necesidad de arrojar lastre. El globo puede permanecer en vuelo en tanto que se mantenga impermeable a las moléculas de helio o hidrógeno. Podemos, pues, recurrir a los globos de sobrepresión para vuelos de duración mucho mayor que los de presión diferencial nula.

Los viajes largos exigen que los globos soporten las condiciones ambientales más extremas, ya sea sobre océanos, desiertos o casquetes polares. Por tanto, el ma-

STEVE SMITH, JR., y JAMES A. CUTTS han trabajado juntos, varios años, en la ingeniería de globos extraterrestres. Smith, director del proyecto de Globos de Duración Ultra-Larga del Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA, se formó en la Universidad de Artes y Minería de Texas. Cutts estudió física en Cambridge y en el Instituto de Tecnología de California. Participó en las misiones *Viking Orbiter* y *Mariner 6*, *7* y *9* y estuvo al frente de la oficina de proyectos especiales del Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena. Se halla ahora adscrito a la Oficina de Exploración de Marte.

terial usado en su construcción debe ser al mismo tiempo tenaz y adaptable, capaz de resistir roturas, desgarrones y perforaciones, soportar la degradación ultravioleta y fabricarse a bajo coste. Se han realizado vuelos de cientos de días de duración a bajas altitudes con globos pequeños a sobrepresión, fabricados con lámina de poliéster. En los años setenta, se intentó construir globos mayores, con mayor capacidad de carga útil y una cota de altitud mayor, pero las limitaciones de las láminas de poliéster, entre ellas su poca resistencia al desgarro, les impidieron avanzar en el modelo a sobrepresión.

En el proyecto ULDB, se decidió que la mejor apuesta para vuelos de muchos meses sería una mezcla de materiales diversos y dotados de las propiedades deseadas. Se sometieron a examen muchas substancias diferentes; entre ellas, láminas, fibras tejidas y sin tejer, poliéster, polietileno, nailon, polipropileno y poliuretano, así como mezclas de ellos. La mezcla que se eligió consta de tres capas: un tejido de poliéster sumamente tenaz, fabricado en Japón, una lámina de poliéster y una lámina de polietileno. La lámina de poliéster es la barrera principal para el helio; el tejido de poliéster proporciona gran parte de la resistencia del compuesto, mientras que el polietileno confina el gas, resiste las perforaciones y aporta resistencia adicional. Tejido y membrana de poliéster ofrecen cierta defensa contra daños que pudieran causar los rayos ultravioleta. Los tres componentes se sueldan mediante un adhesivo suave que permite cierta realineación de las fibras del tejido para compensar los defectos de la urdimbre y los cambios en las condiciones ambientales. El resultado final es un material con una densidad de 55 gramos por metro cuadrado y una resistencia a la tracción de 2600 newtons por metro.

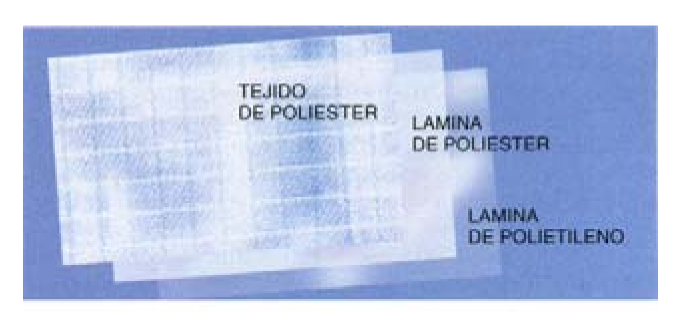
Pese al aumento de resistencia de la mezcla, los ingenieros convinieron en que un nuevo material, por sí solo, no era suficiente para vuelos de larga duración en condiciones extremas y cambiantes. Se necesitaba también un nuevo modelo de globo. Los responsables del proyecto ULDB, tras recabar información de otros programas, optaron por un modelo en forma de calabaza en vez del acostumbrado modelo esférico de los globos a sobrepresión. Los globos esféricos sufren esfuerzos tirantes a lo largo de los meridianos y del ecuador, porque la envoltura del aerostato soporta la mayor parte de las tensiones. Pero la configuración cucurbitácea depende más de los "tendones" meridianos que mantienen unidas las secciones de material, los "gajos". La forma de calabaza reduce los requisitos de resistencia del material a sólo 600 newtons por metro, muy por debajo de la resistencia a la tracción del compuesto. No se trata de un logro menor, si consideramos que el esfuerzo a lo largo de la circunferencia es el producto de la presión local por el radio local de los lóbulos de la calabaza. Como resultado, el tamaño del globo es irrelevante en la determinación de las tensiones de la envoltura. (Los ingenieros buscan ahora una versión más ligera del material, lo que permitiría elevar más carga útil.)

Cuando el globo despegue, en diciembre del 2001, la carga útil TIGER que transporte medirá las concentraciones de los elementos en los rayos cósmicos galácticos con números atómicos entre 26 (hierro) y 40 (circonio) y energías superiores a los 300 millones de electronvolts por nucleón. No es la primera vez que los globos tomarán parte en la investigación de los rayos cósmicos. De hecho, los rayos cósmicos y los rayos gamma astrofísicos fueron descubiertos por sensores a bordo de globos. Además, los rayos ofrecen una muestra de la materia galáctica que se ha sintetizado recientemente en supernovas o que tiene origen en el medio interestelar; de ahí su interés científico.

La misión TIGER apenas si acaba de empezar. Se trabajará con telescopios ópticos e infrarrojos, que buscarán planetas extrasolares o crearán imágenes del Sol y otras estrellas, con telescopios de rayos X duros, rayos gamma, rayos cósmicos y radiación cósmica de fondo en microondas, para rastrear el universo, y, por fin, con experimentos de química estratosférica.

Globos para la exploración planetaria

En las enseñanzas extraídas del proyecto ULDB y otros se fundarán las misiones que habrán de explorar otros mundos. Seis planetas —Marte, Venus, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno— y Titán, satélite de Saturno, gozan de atmósferas que pueden sustentar glo-





3. EL TEJIDO COMPUESTO para el Globo de Duración Ultra-Larga, que se lanzará en diciembre del año 2001, consta de tres capas soldadas (*arriba*). El tejido de poliéster proporciona resistencia; la lámina de poliéster impide que las moléculas de helio escapen, y la lámina de polietileno ayuda a retener el gas y aporta resistencia adicional. La fotografía (*abajo*) muestra la costura final en un modelo pequeño.



4. UNA CAMARA MONTADA EN UN GLOBO puede ver objetos en la superficie de un planeta —en este dibujo, Marte— a una distancia 10.000 veces menor que una cámara a bordo de un vehículo orbital, para lograr así mayor detalle.

bos en vuelo. Pero cada una de esas atmósferas presenta retos peculiares, distintos de los encontrados en la Tierra. Se espera que los aerostatos se conviertan en plataformas económicas para explorar la composición y circulación de tales atmósferas, así como para observar las superficies planetarias mediante sensores remotos. Los globos podrían también servir de rampas de lanzamiento de sondas de exploración, incluidas las encargadas de recoger muestras de la superficie del planeta, muestras que se traerían a la Tierra para su análisis minucioso.

Se piensa en la atmósfera de Marte para ensayar la consistencia de los avances registrados en técnica aerostática. Si tenemos en cuenta que la densidad atmosférica al nivel del mar en Marte es aproximadamente la misma que la de la estratosfera terrestre, un globo que operara a tan sólo unos kilómetros sobre la superficie de ese planeta debería ser, como el ULDB, un globo estratosférico a sobrepresión, capaz de permanecer en vuelo durante meses.

¿Qué aportaría un globo flotando sobre la superficie de Marte que no puedan facilitar otras plataformas, incluidos los satélites en órbita, vehículos de descenso y vehículos móviles sobre la superficie (el *Mars Pathfinder*)? Los vehículos móviles de superficie pueden explorar una zona circunscrita del planeta, pero un globo está capacitado para viajar mucho más lejos y ampliar su panorama de observación. Y aunque los aerostatos no pueden acarrear instrumentos de alcance global como los sensores a bordo de satélites, sí pueden suministrar imágenes mucho mejores de la superficie de un planeta y dar cuenta del magnetismo remanente, el agua subterránea y otras observaciones de factores críticos.

A finales de los ochenta, Francia y Rusia colaboraron en la misión aerostática de Marte. Este proyecto ambicioso se proponía desplegar un globo que transportaría un sistema de construcción de imágenes y dejaría caer un cable guía, que, arrastrándose a lo largo de la superficie del planeta, recogería muestras químicas y realizaría mediciones físicas. Por problemas económicos de Rusia, el proyecto se suspendió en 1995. Dos años después, sin embargo, la NASA comenzó a trabajar sobre técnicas clave necesarias para preparar un globo o aerobot —robot aerostático— mucho más pequeño en Marte. Aprovechando el trabajo acometido por la CNES, la agencia espacial francesa, el proyecto norteamericano ha producido un sistema de inflado en vuelo de pequeña masa, que inició una serie de pruebas estratosféricas la primavera de 1999.

Venus tiene una atmósfera más caliente y espesa que la de la Tierra. Se ha explorado ya. En 1985, la Unión Soviética, Francia y los EE.UU. desplegaron, en un empeño conjunto, dos globos a 54 kilómetros por encima de la superficie del planeta, donde operaron durante unas 48 horas y recorrieron la mitad de la circunferencia venusina. Los instrumentos instalados a bordo confirmaron la existencia de fuertes vientos a gran altitud sobre Venus y midieron la presión y temperatura atmosféricas. Para medir la posición y velocidad de ambos globos, cumplió a la NASA coordinar un sistema de estaciones de seguimiento.

Debido a la consistencia de la atmósfera de Venus, hay que observar el planeta, desde el espacio, en el espectro de radio y ciertas longitudes de onda del infrarrojo; a su vez, las densidades atmosféricas y las temperaturas de la superficie son demasiado elevadas para que los módulos de aterrizaje o vehículos móviles funcionen durante más de algunas horas. Por consiguiente, el globo puede ser una opción interesante si queremos conocer la superficie de Venus. El proyecto Multisonda Aerobot de Venus, así se denomina, prevé situar un globo en las regiones superiores de la atmósfera del planeta y enviar pequeñas sondas a la superficie, donde obtendrían imágenes de alta resolución y datos espectroscópicos que ayudarían a desentrañar la evolución de Venus. Se trata de un proyecto viable incluso con la técnica actual. Misión más ambiciosa es la de un aerobot de "fluido reversible", que realizara varias excursiones breves desde la fría atmósfera superior hasta la superficie de Venus, donde reina una temperatura de 460 grados Celsius. Tras recoger las muestras, el aerobot regresaría a la atmósfera superior para enfriar sus instrumentos y electrónica. La NASA ha puesto ya a punto varios componentes para el buen fin de la misión, entre ellos una barquilla en miniatura que puede soportar nubes de ácido sulfúrico y temperaturas tórridas.

Hay dos grupos, uno en la NASA y otro en la Agencia Espacial Europea, que trabajan en un proyecto para traer a la Tierra una muestra del suelo de Venus. Ambos están de acuerdo en que los globos de alta temperatura desempeñarán una función clave. Podrían encargárseles izar muestras de suelo y rocas hasta una altura de 60 kilómetros, donde la atmósfera del planeta es lo bastante tenue para lanzar cohetes hasta otro vehículo espacial, que recibiría el contenido y lo traería a la Tierra.

Titán es un objetivo de primer orden en las misiones de exploración espacial. Podría conservar intactas especies químicas orgánicas prebióticas, que no se encuentran en ninguna otra parte del sistema solar. Las reacciones fotoquímicas desarrolladas en la atmósfera originan la bruma anaranjada que oscurecía la superficie del satélite cuando la nave *Voyager* pasó por su ve-



5. EL DESPLIEGUE en un planeta remoto requiere que el globo se lance desde un vehículo espacial. El aerostato está encerrado en una cápsula capaz de resistir la entrada en la atmósfera a una velocidad vertiginosa; se despliega y se infla durante el descenso en paracaídas hacia la superficie y después se eleva hasta su altitud de crucero. Los globos del futuro llevarán sondas que recogerán muestras de la superficie de un planeta.

cindad en los años ochenta. Se cree que Titán contiene grandes mares de hidrocarburos y regiones de superficie sólida; su atmósfera, compuesta sobre todo de nitrógeno, es cuatro veces más densa que la de la Tierra, aunque mucho más fría; es decir, lo bastante cálida para impedir su licuefacción. También allí los globos podrían ser plataformas ideales para la exploración. Los aerobots de Titán podrían realizar varios viajes hasta la superficie para tomar primeros planos e incluso acometer *in situ* mediciones de especies químicas prebióticas que, así se cree, podrían encerrar las respuestas a cuestiones relativas al origen de la vida. Algún día, una misión aerostática podría facilitar que un vehículo, elevándose desde Titán, enviara muestras de su superficie hacia la Tierra.

Antes de que los globos intervengan en misiones de exploración espacial, deben resolverse varios problemas, algunos de los cuales son exclusivos del planeta en cuestión. Los nuevos materiales para globos, cruciales en el desarrollo del ULDB, adquieren importancia mayor cuando saltamos al ámbito planetario. Disponer de tejidos más resistentes significa menor peso, lo que permitirá aumentar la carga útil. Las envolturas también tendrán que soportar condiciones ambientales durísimas, como las de la atmósfera de Venus, donde se dan al mismo tiempo altas temperaturas y nubes de ácido sulfúrico. Los instrumentos a bordo han de sufrir un grado mayor de miniaturización. Y habrá que resolver el problema de realizar misiones con globos que consuman la mínima energía.

Queda por averiguar de qué nos valdremos para enviar los aerostatos hasta planetas remotos. En la Tierra, los globos ascienden desde el suelo; en el espacio, se invierte el proceso. Los vehículos espaciales lanzan los globos embalados en cápsulas construidas para soportar la fricción de la entrada en la atmósfera. Después de ello, los aerostatos se abren e inflan mientras descienden hacia la superficie del planeta. De ahí que la NASA investigue en sistemas sencillos y ligeros para el despliegue e inflado de globos en las misiones espaciales.

Con independencia de dónde vuelen, los globos ofrecen enormes posibilidades para la ciencia y sus profesionales. Con el recorte incesante de los presupuestos para la exploración espacial, quienes sepan desenvolverse con menos recursos avanzarán más deprisa. En muchos casos, los globos pueden proporcionar un rendimiento muy superior al ofrecido por los vehículos espaciales para una misma inversión. Esta razón de peso explica por qué los científicos se están organizando para llevar a nuevas alturas el primer medio de vuelo de la humanidad.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE EAGLE ALOFT: TWO CENTURIES OF THE BALLOON IN AMERICA. Tom D. Crouch. Smithsonian Institution Press, 1983.

RACE TO THE STRATOSPHERE: MANNED SCIENTIFIC BALLOONING IN AMERICA. David H. DeVorkin. Springer-Verlag, 1989.

Para más detalles sobre el proyecto del Globo de Duración Ultra-Larga (ULDB), visítese la página NASA en www.wff.nasa.gov/~uldb/ en el World Wide Web.



Un zepelín para el siglo XXI

Mediante el desarrollo de modelos aerodinámicos informáticos y el empleo de materiales compuestos, la compañía que fabricó los zepelines los ha devuelto a los cielos de Europa

Klaus G. Hagenlocher

El camino del verdadero amor nunca se recorre plácidamente. Este sentimiento shakespeariano encuentra reflejo en una de las formas de transporte más románticas del siglo XX, el zepelín. El 5 de agosto de 1908, la ciudad alemana de Echterdingen celebró el primer aterrizaje de un zepelín. El elegante dirigible flotante anunciaba la promesa de una nueva era. Pero, como si se anticipase también el sino infausto del heraldo, sobrevino el desastre al poco. La tarde del viaje inaugural, una ráfaga de viento arrancó a la nave de su hangar. De repente la vapuleada envuelta del zepelín llena de hidrógeno estalló en llamas. La nave quedó totalmente destruida.

Impávido, el epónimo conde Ferdinand von Zeppelin continuó construyendo sus dirigibles; más de un centenar se mostraron válidos para el vuelo. Pero la desastrosa explosión en 1937 del *Hindenburg* en Lakehurst, New Jersey, el estallido de la Segunda Guerra Mundial y el auge del viaje aéreo en reactor convirtieron al zepelín en un símbolo del pasado. La gente todavía ve ocasionalmente globos dirigidos, con su sencillo cuerpo inflado, patrullando en acontecimientos deportivos. Pero los zepelines, más complejos, con rígidas estructuras internas en el



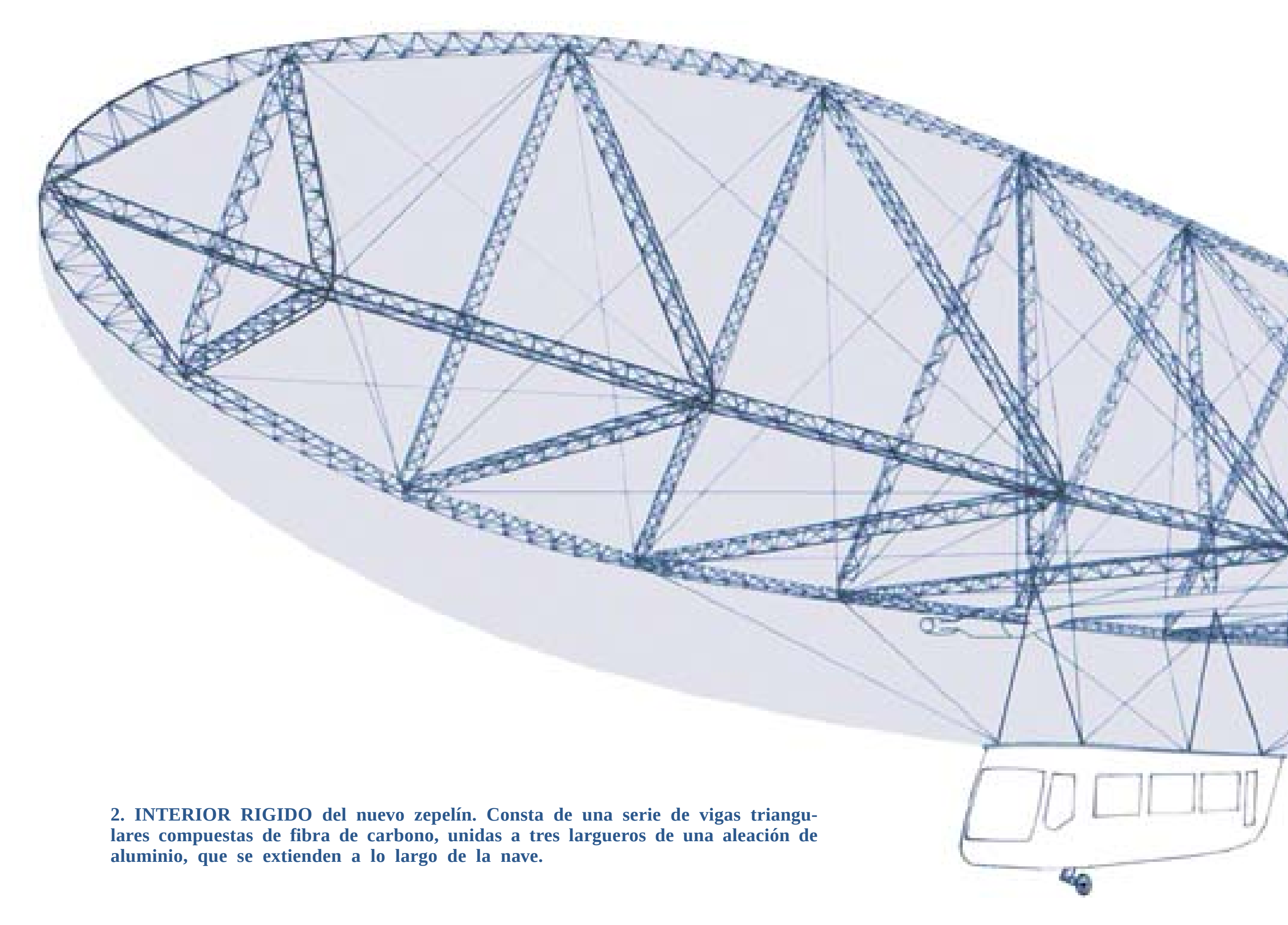
1. NUEVO ZEPELIN, primero de su clase en sesenta años. Gracias a una estructura interna rígida, los motores del zepelín se pueden instalar en zonas distintas de la barquilla, lugar de acoplamiento obligado para los motores de los globos dirigidos. Al alejar los motores de la barquilla se consigue mayor maniobrabilidad de la nave. Con ello, disminuyen también el ruido y la vibración de la cabina.

interior de sus envueltas llenas de gas se extinguieron. O al menos eso parecía hasta el 8 de agosto de 1998.

Casi exactamente 90 años después del accidente de Echterdingen, los cielos de esa ciudad dieron la bienvenida de nuevo a un zepelín. Aunque éste conservaba la misma apariencia general que sus antecesores de tiempo atrás, constituía, en buena medida, una nueva creación. Denominado LZ N07, combina la elegancia y el porte de los dirigibles de antaño con la técnica aeronáutica y electrónica más avanzada. Este no es el zepelín de nuestros abuelos.

Regreso al tablero de dibujo

En las postrimerías de los ochenta, la compañía fundada por Ferdinand von Zeppelin, Luftschiffbau Zeppelin, llevaba ya medio siglo comprometida en otros proyectos técnicos, como la fabricación de antenas de radar y equipo de construcción. Por esa época, los ejecutivos de la compañía Max Mugler y Heinz Kollmann llegaron a la conclusión de que los dirigibles modernos podrían tener



2. INTERIOR RIGIDO del nuevo zepelín. Consta de una serie de vigas triangulares compuestas de fibra de carbono, unidas a tres largueros de una aleación de aluminio, que se extienden a lo largo de la nave.

un hueco en el mercado. Específicamente pensaron que los zepelines de alta técnica podrían desempeñar un papel en publicidad y paseos turísticos, así como en la protección del medio ambiente, sirviendo como plataformas estables para la vigilancia de zonas vulnerables de la naturaleza. Ingenieros e investigadores de otras divisiones fueron escogidos para trabajar en una atmósfera exclusiva al estilo Lockheed: un equipo reducido, alojado independientemente, libre de toda influencia externa y unido en un único propósito. Este grupo, cuya dirección se me encomendó, realizó estudios que examinaban la posibilidad de crear zepelines modernos y determinar su potencial en el mercado.

La revisión de los extensos archivos de Luftschiffbau Zeppelin dio forma a las decisiones del grupo referentes al diseño. La principal, por supuesto, era la seguridad. Esta preocupación llevó a la conclusión obvia de que el helio ininflamable sería el gas elegido. Además, la nave necesitaría determinadas condiciones de vuelo, incluso en el caso de que la presión de la envuelta estuviese comprometida. Otro punto de seguridad era el lastre, que no necesitaría expulsión. Un globo dirigido, más ligero después de soltar su lastre, puede bandearse más fácilmente por el viento cuando vuelve a su base. El dirigible, por tanto, necesitaría un peso constante y robusto.

También en nuestra lista de deseos estaba una reducción del personal de apoyo. Los globos dirigidos necesitan equipos de tierra de 15 o más personas para atrapar literalmente la masa flotante y tirar de ella hacia tierra. Este trabajo, extenuante, no está exento de riesgo; además, el mantenimiento, incluyendo transporte, de un gran equipo terrestre puede resultar un coste gravoso en las operaciones de globos dirigidos. Queríamos que el nuevo zepelín funcionase con un equipo de apoyo más reducido de sólo tres o cuatro personas. Para atraer a los clientes, el nuevo zepelín necesitaría también obvias ventajas de rendimiento sobre los globos dirigidos: mayor velocidad, capacidad para volar en condiciones atmosféricas desfavorables, menor vibración y ruido en la cabina, y manejo más fácil para los pilotos.

En 1990 el equipo de trabajo especializado terminó un diseño. Con la aprobación de la dirección, nos pusimos entonces a construir un modelo de prueba de conceptos. Cuando este zepelín en miniatura de 10 metros de longitud pasó sus sencillas pruebas de vuelo en la primavera de 1991, comenzamos a luchar con las realidades de diseño del prototipo a tamaño real. Este esfuerzo implicaba una parte de trabajo detectivesco y la invención de nuevas técnicas.

Uno de nuestros mayores desafíos era realizar la clase de cálculos normales en la industria de diseño aeronáutico: estimaciones de aerodinámica, tensiones mecánicas y funciones electrónicas para las diferentes opciones de diseño. Con la técnica informática actual, sabíamos el potencial que existía para realizar grandes mejoras sobre el diseño clásico del zepelín. Pero el desarrollo del dirigible terminó básicamente en 1940, y





3. CABINA DE MANDO DE TECNICA AVANZADA (*izquierda*). Incorpora la más moderna instrumentación de navegación y controles "de vuelo por electrónica" que gobiernan la nave. La cola (*derecha*) incluye una hélice trasera, que puede pivotar 90 grados hacia abajo e impulsar la nave hacia arriba, y una hélice lateral que puede mover el zepelín en un círculo, cuyo centro es el morro del ingenio.

no se había producido ningún avance teórico o científico desde entonces. Buscamos por todo el mundo programas informáticos capaces de calcular cargas y tensiones para diferentes maniobras aerodinámicas, pero no encontramos nada. Tendríamos que crear nuestra propia teoría y práctica de diseño de zepelines.

Dos ingenieros matemáticos de nuestro grupo espigaron en la bibliografía cuanto pudiera resultar útil. Junto con miembros del Instituto de Aerodinámica y Dinámica de Gases de la Universidad de Stuttgart, desarrollaron programas informáticos partiendo de cero para calcular las funciones del zepelín. La tarea era complicada, debido al hecho de que el zepelín de tamaño real es algo más que sólo una versión mayor de los modelos de ensayo, que se podían usar en las pruebas preliminares de túnel de viento para generar datos. La voluminosa forma se traduce en una serie de comportamientos distintos para el tamaño mayor. Por ejemplo, el flujo de aire sobre la nave al girar era difícil de calcular, incluso después de las pruebas en el túnel de viento. Los aviones son más sencillos de modelar: sus versiones menores para túnel de viento representan una aproximación razonable a una nave mayor. El LZ N07 a tamaño real es, por tanto, el resultado de nuestros cálculos y programación iniciales, así como, con 400 horas de vuelo ya realizadas, un vehículo de prueba para generar la clase de datos del mundo real que están ayudando a mejorar nuestros modelos informáticos.

En septiembre de 1993, se fundó una compañía independiente, Zeppelin Luftschifftechnik, para construir un zepelín según nuestro diseño, así como para buscar y proteger patentes de los numerosos inventos, que permitirían que despegase el prototipo moderno. (Todos los miembros de una futura flota de zepelines llevarían el nombre genérico de "Zeppelin NT", por "nueva técnica". Cada uno tendría también una designación de "especie", como el LZ N07, donde 07 se refiere a su volumen original de gas de 7000 metros cúbicos, aunque posteriormente expandimos el diseño para acomodar 8200 metros cúbicos.)

El cuerpo de una nueva máquina

La estructura interna rígida de un zepelín sería muy importante para el cumplimiento de muchos de nuestros requisitos. Por ejemplo, los motores se podrían fijar en posiciones más propicias que las disponibles en los globos dirigidos, en las que están limitados a la barquilla sustentada. Semejante colocación limita la maniobrabilidad y aumenta el ruido. Los nuevos motores del zepelín están unidos al bastidor interno oculto, justo por debajo de la superficie.

Los dirigibles legendarios de antaño, como el *Hindenburg* y el *Graf Zeppelin*, tenían complejas estructuras internas, necesarias para soportar su enormidad: cada uno se extendía a lo largo de 243 metros de longitud, con un diámetro de 43 metros y un volumen de 200.000 metros cúbicos. Treinta y seis travesaños longitudinales, llamados largueros, se extendían del morro a la cola, y "anillos de refuerzo" colocados cada cinco metros servían como estructuras reforzantes. Queríamos estilizar lo más posible esta clase de anatomía, que habría sido demasiado pesada y cara para las naves que proyectábamos de 75 metros de longitud. Además, una estructura interna mínima proporciona una menor oportunidad de sufrir daños en aterrizajes difíciles.

Por tanto, en el LN Z07, el elaborado esqueleto de la ancestral nave se sustituye por un simple bastidor triangular, que consta de tres largueros de aleación de aluminio y sólo 12 conjuntos de vigas compuestas de fibra de carbono ligeras y fuertes. Esta disposición da al dirigible la rigidez del tradicional zepelín, pero sólo longitudinalmente. La rigidez radial se mantiene por la presión interna del gas. Todos los componentes externos

—motores, barquilla y superficies de control, como alerones y timones— están unidos al bastidor.

La envuelta, un laminado multicapa, se fija a los tres largueros y rodea al helio y a los globetes, compartimentos de volumen ajustable llenos de aire. Estos globetes pueden tomar aire del exterior de la nave, o soltarlo, para mantener una presión interna constante en el casco durante las ascensiones y los descensos. La colocación delantera y trasera de los globetes permite también ajustes de posición; por ejemplo, bombeando aire desde el globete trasero al delantero se hunde el morro con relación a la cola.

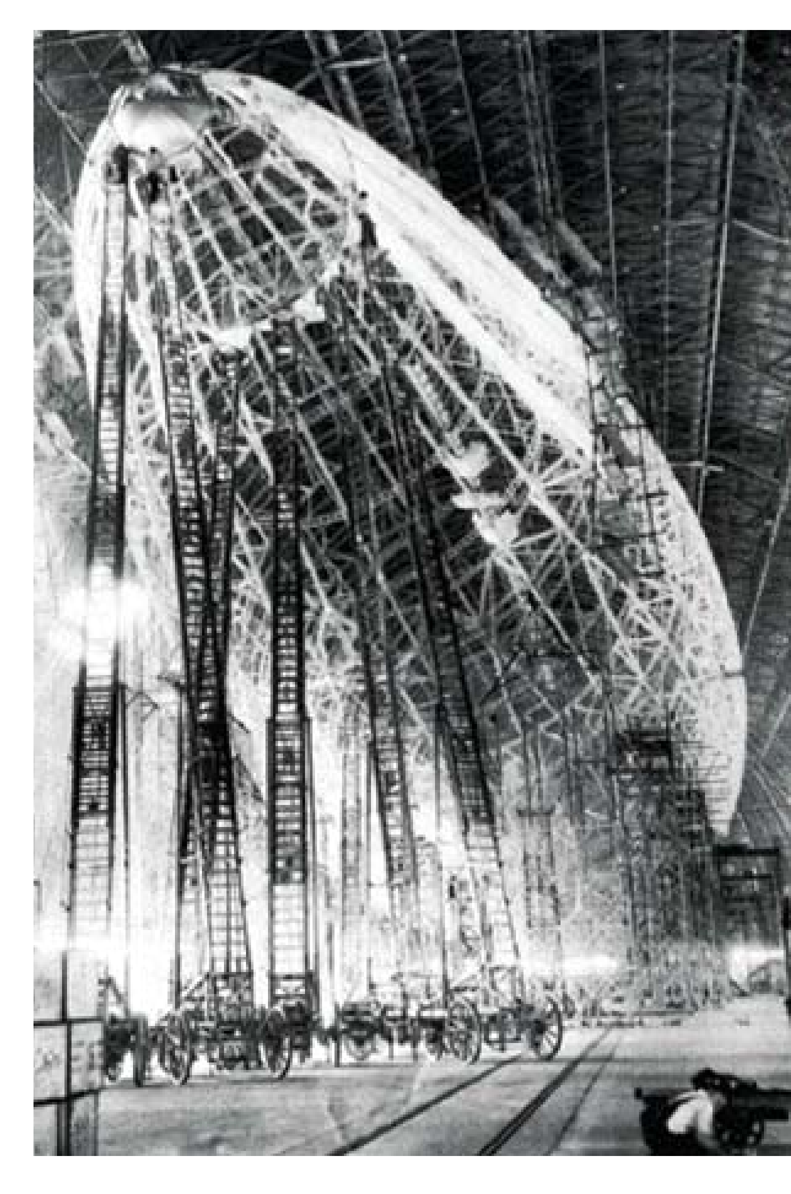
Todo el sistema helio-aire también mantiene una ligera y constante "sobrepresión" dentro de la envuelta de aproximadamente un 4 por ciento superior a la presión atmosférica externa. Mantener baja la sobrepresión es una medida de seguridad. Si la presión dentro de una envuelta es notablemente mayor que la presión externa, cualquier pinchazo produciría un fallo catastrófico. Con una sobrepresión baja, el pinchazo provocaría sólo una fuga lenta del gas interno; el piloto tiene suficiente tiempo para aterrizar con seguridad. En el LN Z07 el bastidor y la envuelta se apoyan también uno en otro; la envuelta tiene su propia integridad en caso de una rotura en el bastidor, que sigue prestando soporte y ciertas condiciones de vuelo aun cuando la envuelta pierda presión.

El deseo de una maniobrabilidad sin paralelo fundamentó la decisión de usar tres motores. Dos de ellos están instalados a izquierda y derecha del fuselaje, justo enfrente del centro de fuerza ascensional. Estos motores impulsan hélices capaces de proporcionar empuje en toda la gama de posiciones de 120 grados. El tercer motor impulsa la hélice de cola, que tiene un campo de movimiento de 90 grados; puede suministrar empuje en cualquier dirección. La unidad trasera también contiene una pequeña hélice en el costado, que puede empujar la cola del dirigible lateralmente; este zepelín puede realizar un círculo con su morro en el centro. Las aspas de las cuatro hélices se pueden desplazar hidráulicamente para colocarlas con su cara frontal hacia delante o hacia atrás, dando efectivamente a cada unidad propulsora la capacidad de desplazarse en marcha atrás.

Los alojamientos de fibra de carbono de todas las unidades motor/hélice ayudan a amortiguar el ruido. Un sistema de engranajes, que reduce las 2750 rpm de los motores hasta unas más lentas 1250 rpm en las hélices, ayuda también a hacer silencioso el viaje. Los motores son más eficaces a mayor velocidad, pero las largas aspas de las hélices producen suficiente empuje a su ritmo más lento y callado.

El ágil manejo del nuevo zepelín y la capacidad para despegar y aterrizar virtualmente en vertical posibilitan la limitada tripulación de tierra que buscábamos. Un camión con un mástil telescópico, que llega hasta una altura de 12 metros, amarra el dirigible. El jefe del equipo de tierra toma una maroma del morro de la nave y la encaja en un sistema de cabrestante fijado al mástil. No se necesita ningún otro contacto físico con cuerdas. El cabrestante remolca la nave hacia el mástil, que entonces se baja telescópicamente hasta el nivel de tierra. El jefe de equipo, el conductor del camión y el operador del cabrestante forman todo el equipo terrestre.

KLAUS G. HAGENLOCHER trabaja en la compañía Zeppelin GmbH en Friedrichshafen, desde 1962. Ingeniero mecánico de formación, dirigió el equipo que desarrolló el nuevo zepelín y la técnica que lo ha hecho posible.



La vista desde el puente

Uno de los triunfos del nuevo dirigible es la cabina de mando. Un piloto de los antiguos zepelines de los años treinta, trasladado a la nueva nave, se sentiría cómodo con los controles básicos de palanca (aunque las pantallas de ordenador podrían distraerle en un principio). Regresando a su propio tiempo, ese piloto manipulaba palancas o ruedas que empujaban o tiraban de cables unidos directamente a timones y elevadores, que aumentaban o disminuían la potencia del motor. Aunque la palanca de la nueva nave realiza la misma clase de funciones, el piloto antiguo se sorprendería de la actual suavidad de movimientos. La facilidad de operación se entiende si miramos las entrañas del sistema de control: los cables se han sustituido por electrónica. El movimiento de la palanca produce señales digitales que indican, por ejemplo, al timón que gire.

Las pantallas de cristal líquido revelan el estado de todas las funciones del dirigible, como la posición de cada timón y elevador y la velocidad de cada aspa de



4. EVOLUCION DEL ZEPELIN puesta de manifiesto en estas vistas de los interiores del nuevo dirigible (*izquierda*) y el *Macon* (*más a la izquierda*), un portaaviones aerotransportado de la Marina de los Estados Unidos anterior a la Segunda Guerra Mundial. El sencillo esqueleto del LZ N07 realiza la función desempeñada anteriormente por la barroca estructura interna del *Macon* de 240 metros de longitud.

las hélices. Hay también en la cabina de mando una pantalla de radar meteorológico, un sistema mundial de localización (GPS) y un sistema electrónico de información de vuelo; el último incorpora un pequeño panel con una rápida lista de los principales datos de interés para el piloto: dirección, velocidad, velocidad vertical, altitud, grado de inclinación, guiñada y balanceo. Los pilotos se sientan en el frente de la barquilla, que puede acomodar hasta 12 pasajeros.

El primer vuelo del nuevo zepelín tuvo lugar el 18 de septiembre de 1997, exactamente 69 años después del *Graf Zeppelin*. El viaje inaugural de 47 minutos del LZ N07 comenzó en un aparcamiento cercano a su hangar de construcción, una sala de exposiciones en la ciudad de Friedrichshafen. Toda la población de la ciudad parecía haberse concentrado para testificar este acontecimiento histórico, lo que añadía nerviosismo al equipo que había dedicado ocho años de inventiva y esfuerzo con la esperanza de hacerlo realidad un día. El dirigible puede haber despegado con mucho menos *Sturm und Drang* que un motor Saturno V, pero nuestras reacciones fácilmente fueron tan alegres como las de los miembros del control de la misión de un viaje lunar después de un lanzamiento con éxito.

Pronto habrá unidades gemelas de esta nave. Los clientes han encargado cinco zepelines hasta la fecha, cuatro para usarlos en publicidad y turismo, y uno reservado para misiones científicas. El éxito de esta empresa nos ha permitido contemplar una vuelta a los zepelines, incluso mayores y construidos con nuestra nueva técnica. Primero saldrán prototipos de tamaño intermedio. Pero el LZ N20, con capacidad para quizá 50 pasajeros, es una posibilidad. En un futuro cercano, miles de personas podrán disfrutar de la más flotante experiencia turística de sus vidas, deslizándose serenamente sobre vistas panorámicas en la cabina de un zepelín del siglo XXI.

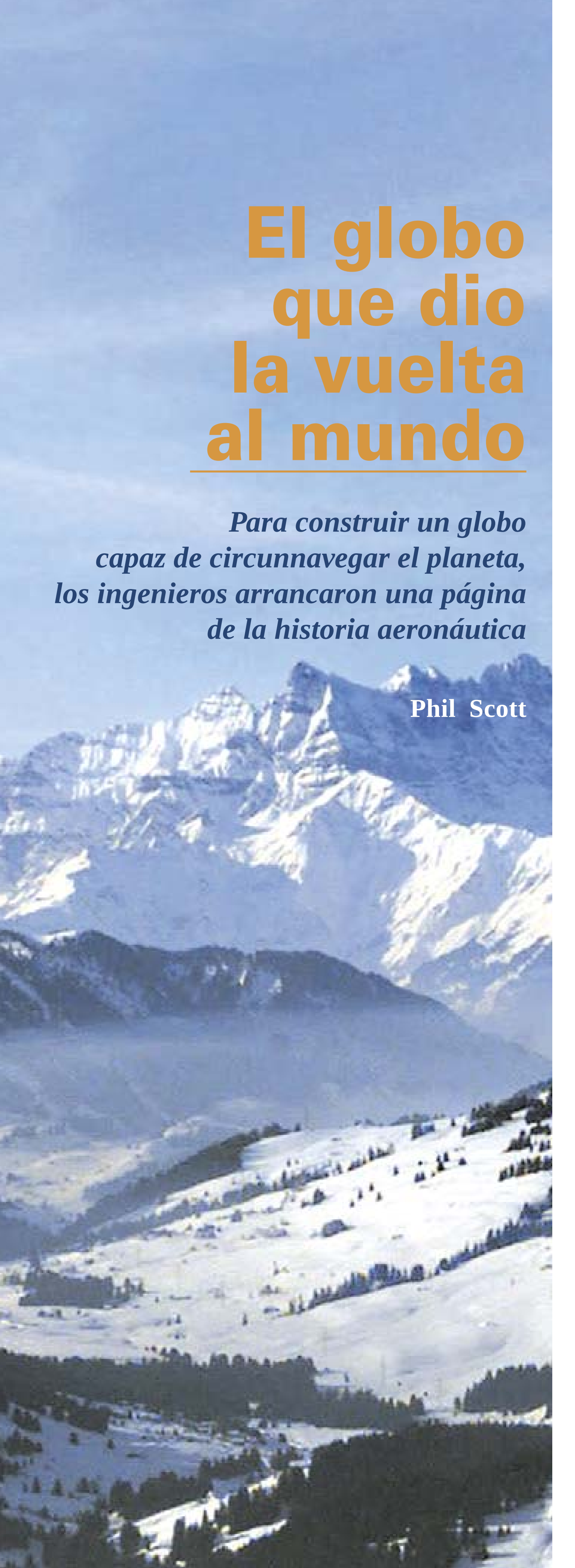
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GOLDEN AGE OF THE GREAT PASSENGER AIRSHIPS; GRAF ZEPPELIN AND HINDENBURG. Harold G. Dick y Douglas H. Robinson. Smithsonian Institution Press, 1992.

COMPANY TOWN. William Garvey en *Air & Space Smithsonian*, vol. 11, n.º 6, págs. 60-67; febrero/marzo 1997.

La página Web de Zeppelin Luftschifftechnik GmbH está disponible en la dirección en www.zeppelin-nt.com/ de la World Wide Web.


BREITLING
ORBITER 3



El globo que dio la vuelta al mundo

Para construir un globo capaz de circunnavegar el planeta, los ingenieros arrancaron una página de la historia aeronáutica

Phil Scott

¿Qué se puede hacer después de haber pisado la Luna? Mientras el siglo avanza hacia un ocaso grisáceo, los hitos aeronáuticos se agrupan alrededor de la más antigua de las invenciones humanas relativas al vuelo: el globo. Cruzado el océano Atlántico en 1978 y luego el Pacífico en 1981, para los aficionados al globo sólo quedaba un último desafío, la circunnavegación del planeta sin escalas.

La vuelta a la Tierra en aerostato no despertaba pasiones competitivas entre las superpotencias. A lo largo de los últimos veinte años, la épica la han protagonizado deportistas aventureros, millonarios, que han tratado de conseguir un trofeo definitivo. Se lo llevaron, en marzo de 1999, Bertrand Piccard y Brian Jones, quienes lograron la hazaña a bordo del *Breitling Orbiter 3*.

En cuanto hito de la técnica, una bolsa de gas que da la vuelta a la Tierra queda muy por debajo del módulo lunar; ni siquiera llega a la complejidad de un reactor de pasajeros. Pero también está a años luz del globo de nailon con forma de lágrima y pintado con los colores del arco iris que, unido a una cesta de mimbre, alegra una fiesta campestre.

El globo deportivo mide 18 metros de altura. Su volumen de 2550 metros cúbicos se calienta con un quemador de propano. Hay suficiente combustible a bordo para mantenerlo flotando plácidamente hasta dos horas, a la velocidad y dirección exactas del viento. Sus parientes mayores y de larga duración persisten en vuelo más tiempo, pero cada noche el calor de la envuelta se radia hacia el espacio, obligando a arrojar lastre y combustible por la borda, entre el 10 y el 20 por ciento del peso bruto del globo, para mantenerse fuera del océano o por encima de las cumbres montañosas. De eso se desprende un límite natural de resistencia, cifrado entre cuatro y ocho días. Así las cosas, sería impensable un viaje de proporciones mundiales con un mínimo de 36.000 kilómetros y una duración de tres semanas.

Para diseñar una nave capaz de acometer ese viaje, los ingenieros se fijaron en una página de los albores históricos de los viajes en globo. A finales de 1783. Sólo unos días después de que Pilâtre de Rozier y el marqués de Arlandes se elevaran en un globo de aire caliente, su compatriota francés Jacques Charles voló con el primer globo lleno de hidrógeno. Transcurrido año y medio, Rozier intentó cruzar el Canal de la Mancha en un globo híbrido, que combinaba aire calentado con llama y una célula llena de hidrógeno explosivo. No tardó en convertirse en la primera víctima de la aeronáutica.

Don Cameron, cuya empresa Cameron Balloons goza de merecida fama en la aerostación deportiva, vio que la configuración de doble gas de Rozier era prometedora. A diferencia del aire, un gas ligero como el hidrógeno —o el helio, menos explosivo— persiste en su liviandad sin un consumo constante de combustible. Pero también se eleva cuando se calienta y desciende al enfriarse. Ahí es donde los quemadores y el aire caliente son útiles.

“El secreto para hacer que un globo de gas vuele durante largos períodos es mantener el helio a la

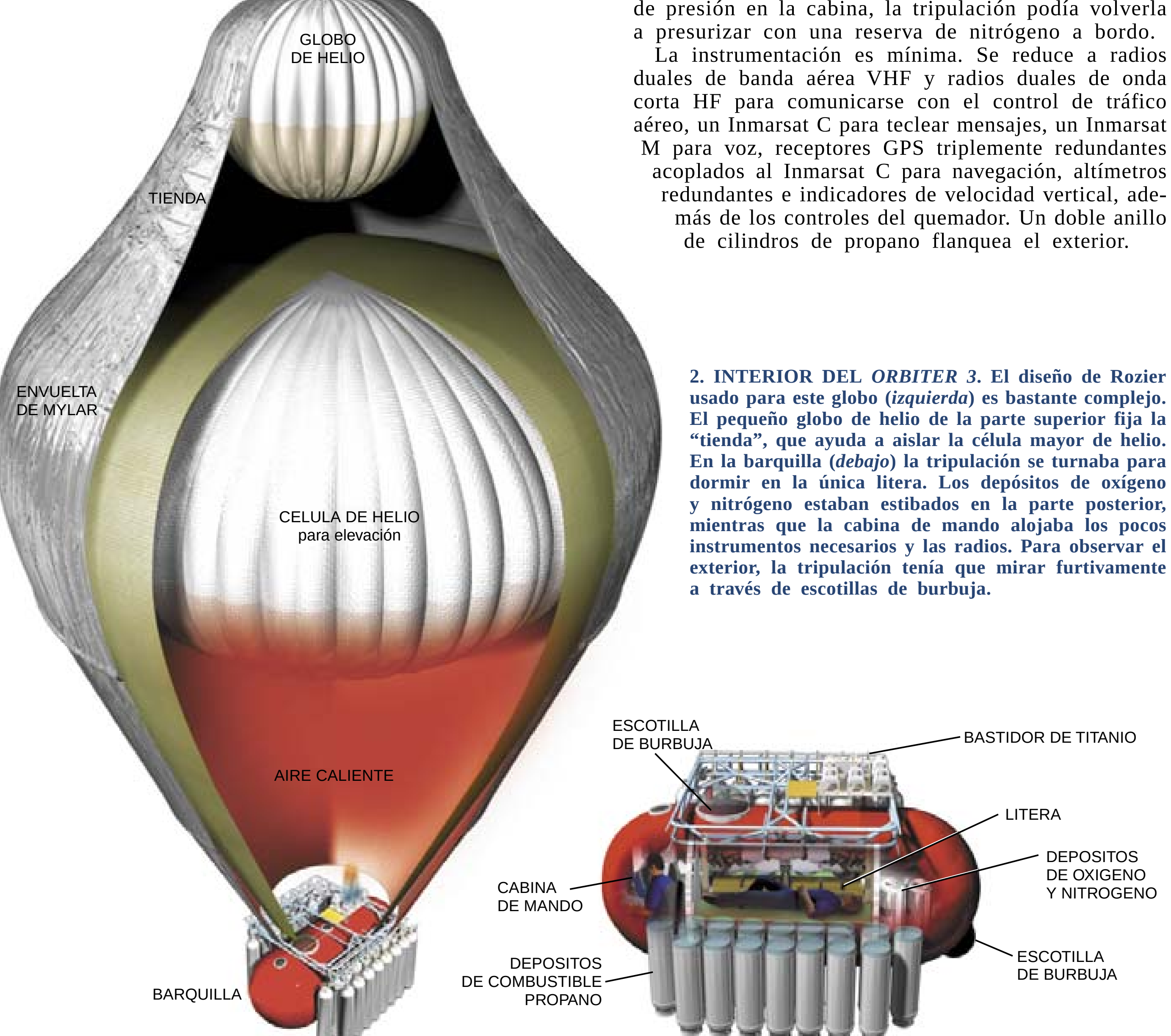
1. *BREITLING ORBITER 3* sobrevolando los Alpes tras el despegue desde Château d’Oex, Suiza, el 1 de marzo de 1999, fecha de partida de su histórico vuelo alrededor del mundo.

misma temperatura día y noche”, declara Alan Noble, director de proyectos de Cameron Balloons. “Durante el día, tiende a calentarse con la radiación solar; por la noche, tiende a enfriarse liberando calor al espacio. A nosotros compete lograr mantener la temperatura lo más estable posible.” Cameron ha dedicado su diseño a Rozier. El prototipo sitúa una célula de helio por encima de un cono invertido de aire, calentado por propano. Para ascender los tripulantes calientan el cono de aire, que a su vez calienta y expande el helio. La envuelta externa del globo consta de dos capas, y el espacio muerto de aire entre ambas recorta en un 50 por ciento la pérdida de calor por la noche. Durante el día, el sol calienta el helio; ahora bien, si el globo quisiese elevarse hasta una altitud indeseable, unos ventiladores alimentados por energía solar pueden insuflar aire frío de manera que la temperatura interior permanezca estable. “Es lo que llamamos acondicionamiento de aire y doble protección”, detalla Noble.

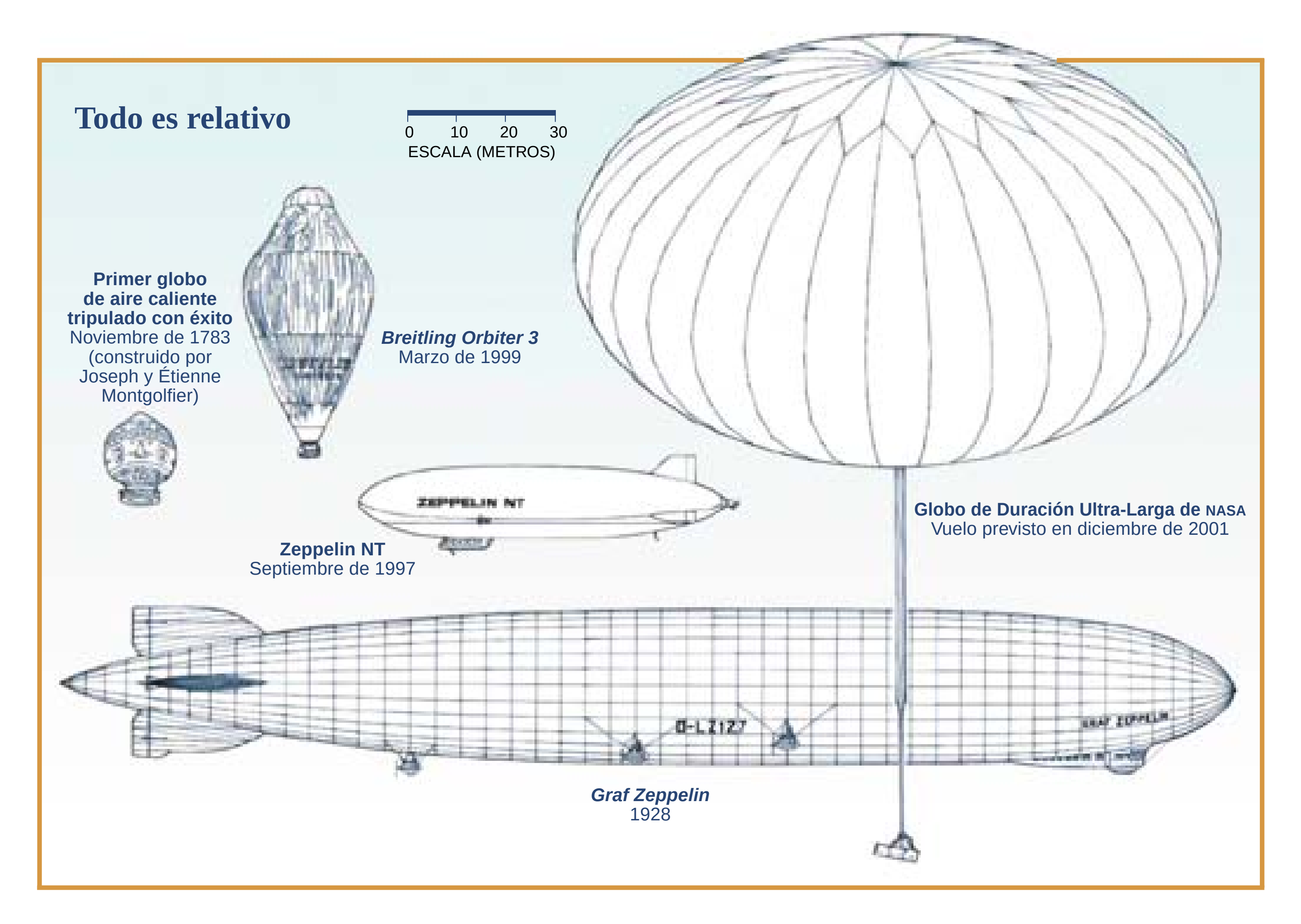
También es lo que se llamaría un éxito. La mayoría de los vuelos de larga distancia y duración se han realizado con Roziers construidos por Cameron, incluido el *Breitling Orbiter 3*.

Bajo esta compleja bolsa va amarrada una barquilla. La góndola debe proporcionar todas las comodidades de una cápsula espacial: alojamiento para dormir, almacenamiento de comida, retrete y soporte vital. En el interior de la corriente de chorro, superior a 115 kilómetros por hora y existente entre 6000 y 15.000 metros, la temperatura permanece cercana a –56 grados Celsius. En esas condiciones, un ser humano sin protección puede sobrevivir un par de minutos. La barquilla del *Breitling Orbiter 3*, un cilindro estanco de fibra de carbono y Kevlar de 5,5 metros de largo y un poco mayor de 2,75 metros de diámetro, se presurizaba a 2500 metros (casi la misma altitud de la presión de una cabina de un avión de pasajeros) con sólo sellarla a esa altitud. Los depósitos de oxígeno suministraban a la tripulación gas para respirar. Los filtros de litio limpiaban el dióxido de carbono que exhalaban. En el caso de una pérdida no catastrófica de presión en la cabina, la tripulación podía volverla a presurizar con una reserva de nitrógeno a bordo.

La instrumentación es mínima. Se reduce a radios duales de banda aérea VHF y radios duales de onda corta HF para comunicarse con el control de tráfico aéreo, un Inmarsat C para teclear mensajes, un Inmarsat M para voz, receptores GPS triplemente redundantes acoplados al Inmarsat C para navegación, altímetros redundantes e indicadores de velocidad vertical, además de los controles del quemador. Un doble anillo de cilindros de propano flanquea el exterior.



2. INTERIOR DEL *ORBITER 3*. El diseño de Rozier usado para este globo (*izquierda*) es bastante complejo. El pequeño globo de helio de la parte superior fija la “tienda”, que ayuda a aislar la célula mayor de helio. En la barquilla (*debajo*) la tripulación se turnaba para dormir en la única litera. Los depósitos de oxígeno y nitrógeno estaban estibados en la parte posterior, mientras que la cabina de mando alojaba los pocos instrumentos necesarios y las radios. Para observar el exterior, la tripulación tenía que mirar furtivamente a través de escotillas de burbuja.



Pese a todo, la suerte caprichosa es el componente decisivo de cualquier circunnavegación afortunada de una nave que se desplace con vientos volubles. (Todas las circunnavegaciones en globo comienzan en invierno, cuando la corriente de chorro es más intensa.) Si se repartiera el premio a la tenacidad habría que otorgárselo a Steve Fossett. En enero de 1995 pilotó un Rozier construido por Cameron desde Seúl a Saskatchewan, logrando entonces un récord mundial absoluto de distancia de 9878 kilómetros. A principios de 1996 despegó desde Dakota del Sur, pero aterrizó poco después cuando la envuelta exterior de su globo comenzó a hacerse trizas. En 1997 su *Solo Spirit* le llevó desde San Luis a la India (16.674 kilómetros), donde aterrizó por escasez de combustible; posteriormente en 1998 voló de Missouri a Krasnodar, en Rusia (11.748 kilómetros), antes de que problemas técnicos le obligasen a descender. El siguiente agosto Fossett lo intentó de nuevo —desde el hemisferio sur—, pero esta vez su Rozier se rompió durante una tormenta, y amerizó en el océano. Richard Branson, el famoso propietario de Virgin, después de haber intentado él mismo dos veces la circunnavegación, ofreció una plaza en su globo ICO Global 1998 a Fossett, que por entonces no tenía globo. Pero este intento también terminó por escasez de combustible después de 21.450 kilómetros.

La tripulación del *Breitling Orbiter*, capitaneada por Piccard, amerizó seis horas después de partir en su intento de 1997, cuando se soltó un pequeño elemento de sujeción y provocó que la barquilla se inundase de combustible. En enero de 1998, Piccard estuvo al mando del *Breitling Orbiter 2*, que despegó de Suiza y llegó hasta Myanmar (Birmania). El *Breitling Orbiter 3* de 1999, con Piccard y el copiloto Jones, estaba tocado por los dioses: el tiempo atmosférico, la técnica y la política internacional conspiraron felizmente para un vuelo que cubrió 42.714 kilómetros desde Suiza hasta Egipto y duró 19 días, 1 hora y 49 minutos.

Pero ahora que los humanos han traspasado esta última meta, ¿qué más podría aguardar a los enrarecidos Roziers, y en general a los viajes en globo de gran presupuesto? Noble tiene ya una respuesta. "Para nuestra próxima empresa estamos planeando formar un equipo femenino de circunnavegación." La Federación Aeronáutica Internacional ha anunciado que organizará una carrera en globo alrededor del mundo aproximadamente en el año 2001. Sin olvidar batir el récord mundial de altura, situado en 34.668 metros, logrado en 1961 por los comandantes de la Marina de Estados Unidos Malcolm Ross y Victor Prather.

PHIL SCOTT, experto en aeronáutica, acaba de publicar *The Pioneers of Flight: A Documentary History* (Princeton University Press, 1999).

PERFILES

Marguerite Holloway

RACHEL S. HERZ: El poder rememorador de los olores

Algunos se lo provoca la quema de la hojarasca y el aroma fresco de madera húmeda en otoño. A otros, el agua de rosas o la lavanda, el polvo mohoso del desván o el intenso olor a almidón de una camisa recién planchada. A Marcel Proust, era la fragancia de una magdalena empapada en té con pétalos de lima. Sea lo que fuere lo que a uno le hace rememorar su pasado, un recuerdo intenso y vívido, una rara experiencia de simultaneidad, Rachel S. Herz quiere llegar hasta el final.

Esta psicóloga del Centro de Sensaciones Químicas Monell de Philadelphia ha ido sistematizando fenómenos proustianos durante un decenio, examinando la relación entre el olfato, la memoria y la emoción. Aunque el vínculo entre el olor y los recuerdos es algo familiar para la mayoría, Herz se cuenta entre los pocos que investigan su fundamento. Con su trabajo ha demostrado que el olor, potente evocador para la memoria, presenta una eficacia mayor en el revivir de las emociones que en rememorar hechos. Ha indagado, entre otras cosas, las diferencias en el olfato y en la selección de la pareja según el sexo, la influencia del olor en el rendimiento en los exámenes, las variaciones de los hemisferios cerebrales en la percepción de los aromas y el influjo de las palabras en la manera en que percibimos los olores.

"Es una especie de precursora", dice Howard Eichenbaum, neurólogo de la Universidad de Boston. "Recoge historias antiguas, corazonadas y observaciones accidentales que se han realizado durante cientos de años, y las comprueba. El suyo es el único trabajo en esta área."

Herz, menuda y vivaracha mujer de larga melena, acabó estudiando el olfato tras muchos rodeos. No sería extraño que la policromía de su trabajo sobre el olor y la memoria se deba a su recorrido peripatético por múltiples temas. Pasó su niñez de traslado en traslado, al hilo de las plazas que sus padres (profesores de inglés y matemáticas) iban obteniendo en Estados Unidos, Europa y finalmente Canadá. Recuerda su atracción inicial por la genética. También por la psiquiatría. "Me interesaba mucho la idea de hablar con la gente para encontrar sus problemas", señala. No así los recovecos de los cadáveres, y quedó claro que la facultad de medicina estaba excluida.

Se matriculó en psicología. En la Universidad Queen's de Kingston recibió sólidos cimientos sobre el aprendizaje de la conducta y estudió el efecto de los estimulantes en el condicionamiento ambiental de las ratas. Pero Herz pronto decidió que los cadáveres de ratas no le atraían mucho más que los humanos. Fue mientras preparaba su examen de grado cuando recuerda su primera reflexión en torno al olfato. Se encontró con un texto que afirmaba que los olores son un desencadenante fundamental de la memoria y las emociones. "Se me vino esta pregunta: bueno, ¿y por qué ocurre esto? Parece raro e interesante. Lo dejé en suspenso."

Habiendo cursado sus solicitudes, partió de viaje. Parte de su estancia en el extranjero se la pasó buscando el gusto de la aventura en una cueva de Grecia, donde compartía cobijo con cabras salvajes. De vez en cuando llamaba a casa para conocer si había alguna novedad sobre su admisión. "Mi expediente académico no era para tirar cohetes", confiesa. "Y me acuerdo que pensaba qué iba a hacer si acababa mi vida así: decoración de interiores con cabras. Quizá habría acabado también estudiando los olores de esa manera."

La aceptó la Universidad de Toronto, y en 1986 Herz regresó de su retiro en Creta "lista para abrazar el capitalismo occidental y enrolarme en estudios de posgrado". Comenzó con los agentes evocadores de la memoria en los carboneros capirotados. Pero cazar esas avecillas en los bosques durante el crudo invierno o correr por los pasillos con un cazamaripo-



1. El recuerdo del pasado: Rachel S. Herz cimienta las bases científicas de las evocaciones plasmadas en la literatura por el té y las magdalenas de Marcel Proust

sas si se escapaban del laboratorio no le satisfacía: "El asunto de los carboneros me hizo distraerme."

Aunque recibía una excelente educación sobre la teoría de la evolución, Herz dice que cada vez tenía más claro que a ella no le interesaban en absoluto los animales, salvo en lo que su comportamiento tenía de parecido con el humano. Tras acariciar la idea de dedicarse a investigar el sueño ("no dormía muy bien") o de hacerse astrofísica ("me compré un manual y me dije que iba a hacer problemas en las vacaciones de Navidad, y que si me salía uno solo me pasaría a la astrofísica"), Herz decidió trabajar con Gerald C. Cupchik, que estudiaba la estética y las emociones.

Herz empezó a examinar las impresiones de las personas sobre sus propios estados emocionales. "Pero no me entusiasmaba mucho", dice. Entonces, durante un curso de primatología (la asignatura opcional que había escogido) se encontró con un estudio de 1988 dirigido por Howard Ehrlichman, de la Universidad Municipal de Nueva York. Los científicos habían empleado aromas para inducir estados temperamentales en los sujetos. "Y su introducción —relata Herz, excitada todavía después de más de 10 años— ¡era todo aquello de que los olores son inductores biológicos fundamentales!"

El eco de la antigua referencia desencadenó lo que Herz denomina el efecto dominó en sus razonamientos: todas las piezas de sus estudios encajaron. Le preguntó a Cupchik si podía estudiar los olores; éste le contestó que lo ignoraba todo sobre el particular, pero que hiciera lo que le gustara, una respuesta por la que Herz le quedó agradecida. "No me dijo que tenía que hacer lo que a él le interesaba, la actitud típica del director de tesis." Herz leyó todos los artículos que pudo encontrar y viajó a diestro y siniestro, preguntando a los expertos. Richard L. Doty, que ahora dirige el Centro del Olfato y del Gusto de la Universidad de Pennsylvania, le sugirió que se pusiera en contacto con International Flavors & Fragances, que tiene sus oficinas centrales en Nueva York. "Debieron pensar algo así como ¿y quién es esa chica que se presenta por las buenas y aparece pidiendo que le enseñemos cómo encauzar su trabajo de tesis?", dice entre risas. Pese a todo, salió de la empresa con un juego de esencias y con unas técnicas de investigación.

Hasta aquel momento, no menudeaban los trabajos sobre olores y memoria. Se sabía de la singularidad del sistema olfativo, el único sentido que tiene contacto directo con el sistema límbico: conecta con la amígdala, nuestro centro emocional, y con el hipocampo, un centro de la memoria. Pero más allá de la observación de estos atributos fisiológicos y de llevar a cabo contados experimentos, no se había dado ningún paso interesante. Herz decidió averiguar si realmente es el olor lo que mejor despierta la memoria.



2. Asociados con un aroma, los cuadros pueden recordarse simplemente con la fragancia. Las emociones así evocadas por las pinturas se recuerdan con mucha más viveza

En sus primeros experimentos, mostraba cuadros a los individuos dispuestos al ensayo mientras inhalaban un aroma o les sugería que se imaginaran que olían cierta fragancia. Pocos días después se les proporcionaba el aroma o una palabra que describía el perfume. Herz descubrió que no era más preciso lo uno que lo otro: en la presencia de la palabra "manzana" o con el aroma de una manzana, los individuos podían recordar que habían visto el cuadro de un chico con un perro. Pero el aspecto emocional del recuerdo (lo que la pintura les había hecho sentir) era mucho más fuerte en la presencia real del olor.

Herz continuó con las pruebas cruzadas. Recurría al tacto (haciendo que los sujetos palparan objetos escondidos en una caja), a música no fácilmente identificable y a imágenes abstractas. "Una de las cosas que podría constituir mi talón de Aquiles es que los olores son muy difíciles de describir con palabras", explica. "Incluso cuando se huele crema bronceadora, uno puede decir: 'sé lo que es esto', sin que nos salga el nombre 'crema bronceadora'."

Le preocupaba que los sujetos fueran más emocionales describiendo un aroma porque parecía más palpable que las palabras. Pero encontró que ni los objetos palpables de la caja ni la música indescriptible evocan los mismos recuerdos emocionales o provocan el mismo ritmo cardíaco acelerado que los olores.

Las fuertes emociones que desata el olor pueden manifestarse de manera muy dispar. Herz y Gisela Epple, de Monell, presentaron a unos niños la prueba de resolución de un laberinto, irresoluble, en presencia de cierto aroma. Luego les asignaron una tarea viable, a unos en presencia del aroma anterior, a otros en presencia de un nuevo olor y a otros en una habitación sin olores. Los niños que olieron "fracaso" lo hicieron mucho peor en la segunda prueba que los que no olían el olor original o los que olían uno nuevo.

Esta potencia emocional es lógica, arguye Herz, dado que al principio era el aroma: los organismos utilizaron sensaciones químicas para aproximarse al bien (comida) y alejarse del mal (predadores). Puesto que el sistema límbico creció a partir del sistema olfativo, la dicotomía emocional entre el bien (supervivencia, amor, reproducción) y el mal (peligro, muerte, fracaso) refleja la quimiosensorial. "Creo que el olfato y la emoción son la misma cosa desde un punto de vista evolutivo", afirma. "Me parece que las emociones son sólo una especie de versión abstracta de lo que el olfato le dice a un organismo primitivo. Y ésa es la razón por la que el olor tiene una cascada emocional tan fuerte."

Los hallazgos de Herz sobre las elecciones sexuales respaldan su idea. Varios investigadores sugieren que las mujeres tienen un mejor sentido del olfato que los hombres; detectan por el olor a los varones que producen diferentes anticuerpos. Esta selección podría asegurar que su descendencia fuera capaz de dotarse de una gama más amplia de anticuerpos. Herz encontró pruebas adicionales. En un artículo muchas veces citado, expuso que las mujeres consideran el olor "la variable más importante en la elección de pareja", mientras que los hombres valoran el olor y el aspecto por igual.

Trasplantes de glía

Reparación del sistema nervioso central

Las neuronas son las células esenciales del sistema nervioso, encargadas de transmitir señales procedentes del exterior del organismo y, en el interior de éste, de un órgano a otro.

Menos conocido es el otro componente celular del sistema nervioso, también esencial. Estoy aludiendo a las células gliales o, simplemente, la glía. Tanto en el sistema nervioso central —cerebro y médula espinal—, como en el periférico —nervios y ganglios—, el número de células gliales quintuplica o decuplica la cifra de neuronas. Sin la glía, las neuronas no podrían cumplir su misión.

La glía, en sus distintos tipos, viene a ser la nodriza de las neuronas, asegurándoles un medio estable. Las células gliales suministran a las neuronas metabolitos; captan e inactivan los neurotransmisores, cuyo exceso, tras ejercer su función mediadora, podría ser neurotóxico. Controlan la composición iónica del medio extracelular de una manera directa o a través de su intervención en la barrera hematoencefálica. Son, por fin, el aislante que permite la transmisión eléctrica rápida y libre de cortocircuitos.

La pérdida funcional persistente que provocan las lesiones del cerebro y la médula espinal deriva de la interrupción de circuitos neurales, causada por la muerte neuronal y la destrucción de axones. A los daños infligidos a las neuronas les acompaña la transformación de una proporción variable de glía normal (o en reposo) en glía reactiva. La glía reactiva, que inhibe la regeneración axonal, representa el obstáculo principal en la reparación de lesiones del sistema nervioso central.

Desde el punto de vista clínico, la glía muestra aspectos benéficos y deletéreos a un tiempo. Semejante conflicto de intereses refleja la contradicción entre el imperativo inmediato de supervivencia (por ejemplo, la necesidad de limitar el edema o la de restituir la *glía limitans*) y la necesidad de restituir las funciones perdidas.

Las células astrogliales son fuente de factores de crecimiento, pero la glía reactiva se erige en uno de los mayores obstáculos contra la regeneración de axones lesionados. Para superar esa oposición, en nuestro laboratorio del Instituto Cajal hemos abordado el problema mediante el trasplante de células gliales.

Nuestra idea directriz es la de poder crear un entorno que, superando la inhibición por la glía reactiva, sea propicio al crecimiento axonal. Hemos realizado dos tipos de trasplantes de glía. El primero, el de astroblastos, potencia la respuesta del huésped lesionado; el segundo, el trasplante de glía envolvente, potencia la formación de brotes neuríticos regenerativos y los protege de la influencia inhibidora de la glía reactiva.

Vayamos con el primero, con trasplantes de astrocitos purificados. Las numerosas funciones que los astrocitos desempeñan en circunstancias normales, cambian cualitativa y cuantitativamente a raíz de una lesión. La atención de esas células del sistema nervioso se centra ahora en dar una respuesta eficaz a la lesión. Además de sus funciones habituales, la glía ha de desconectar sinapsis, fagocitar restos celulares, relacionarse con el sistema inmunitario, producir cantidades extra de factores de crecimiento, restituir la *glía limitans* y la barrera hematoencefálica, y mil funciones más.

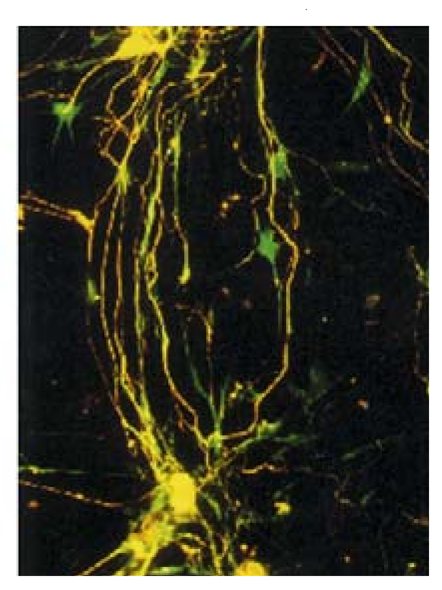
En esta situación, las células gliales están sujetas a demandas acuciantes. Los astrocitos disponibles intentan satisfacerlas mediante varias reacciones plásticas; entre ellas, la hipertrofia y la división celular. Ahora bien, las lesiones grandes pueden superar la capacidad de la glía dispo-



GLIA ENVOLVENTE



AXONES



INTERACCION AXON-GLIA

nible; en este caso, el trasplante de astroblastos se ha mostrado útil.

Los astroblastos son astrocitos inmaduros, que pueden cultivarse a partir de tejido cerebral perinatal. Están capacitados para unir e inactivar excitotoxinas; pueden producir factores neurotróficos, laminina y proteoglicanos neuritogénicos.

Demostramos en 1986 que, en la rata, el trasplante de astroblastos purificados acelera la reparación de las consecuencias conductuales de la ablación de la corteza frontal. Los astroblastos trasplantados ayudaron a los astrocitos nativos a soportar la carga adicional impuesta por la lesión. De ello cabe inferir que podrían favorecer la plasticidad neuronal y facilitar la recuperación de los efectos de las lesiones sufridas en el sistema nervioso central.

Veamos el segundo tipo, a saber, los trasplantes de glía envolvente de bulbo olfatorio. El crecimiento axonal depende de señales que las neuronas intercambian con otras neuronas y con células gliales. Por su relativa abundancia, la intervención de las células gliales resulta determinante en el crecimiento de axones o en su inhibición. Los brotes axonales de las neuronas adultas sólo pueden crecer en el entorno que les proporcionan los trasplantes de glía periférica.

En el sistema nervioso central de los mamíferos, el único sitio donde los axones lesionados pueden regenerarse espontáneamente es en el bulbo olfatorio. La razón de ello parece estribar en que los axones olfatorios están rodeados de un tipo de glía especial, llamada *glía envolvente*.

La glía envolvente, presente en los componentes periférico y central del sistema olfativo, posee propiedades intermedias entre las de los astrocitos y las de la glía periférica o células de Schwann. Así, mientras que la migración de las células de Schwann en el sistema nervioso central está fuertemente restringida, la glía envolvente no sufre una limitación similar.

La glía envolvente posee sus propiedades neuritogénicas similares a las células de Schwann. Está capacitada para migrar e integrarse en el sistema nervioso central, lo mismo que los astrocitos. Su capacidad de envolver axones y aislarlos del microambiente hostil (glía reactiva) tras una lesión ha posibilitado el uso de trasplantes de esta glía para promover la regeneración de axones sensoriales y su navegación en la médula espinal a través de capas de glía reactiva.

Los trasplantes de glía envolvente promueven la regeneración axonal en la médula espinal. Estamos explorando su uso en otras áreas del sistema nervioso central. El recurso a trasplantes de glía envolvente nos proporciona una visión más optimista del futuro de grandes lesionados medulares.

MANUEL NIETO SAMPEDRO
Instituto Cajal, CSIC

Plegamiento de proteínas

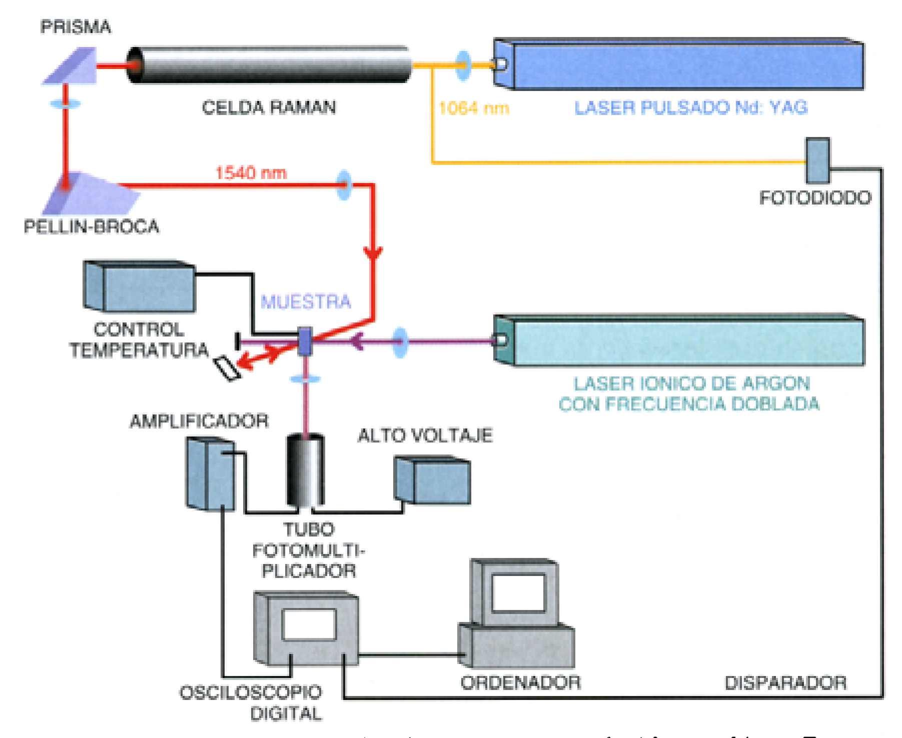
Formación de horquillas beta

El reto principal que la biología molecular tiene planteado estriba en entender el mecanismo en virtud del cual la información genética da lugar a las funciones que operan en un organismo. Hoy en día, podemos obtener la secuencia de aminoácidos de una proteína a partir de la secuencia de ADN genómico simplemente usando las reglas del código genético. También sabemos que cada proteína se pliega en una estructura tridimensional única, la cual determina su función biológica, y que las propiedades de esa estructura vienen establecidas por su secuencia de aminoácidos.

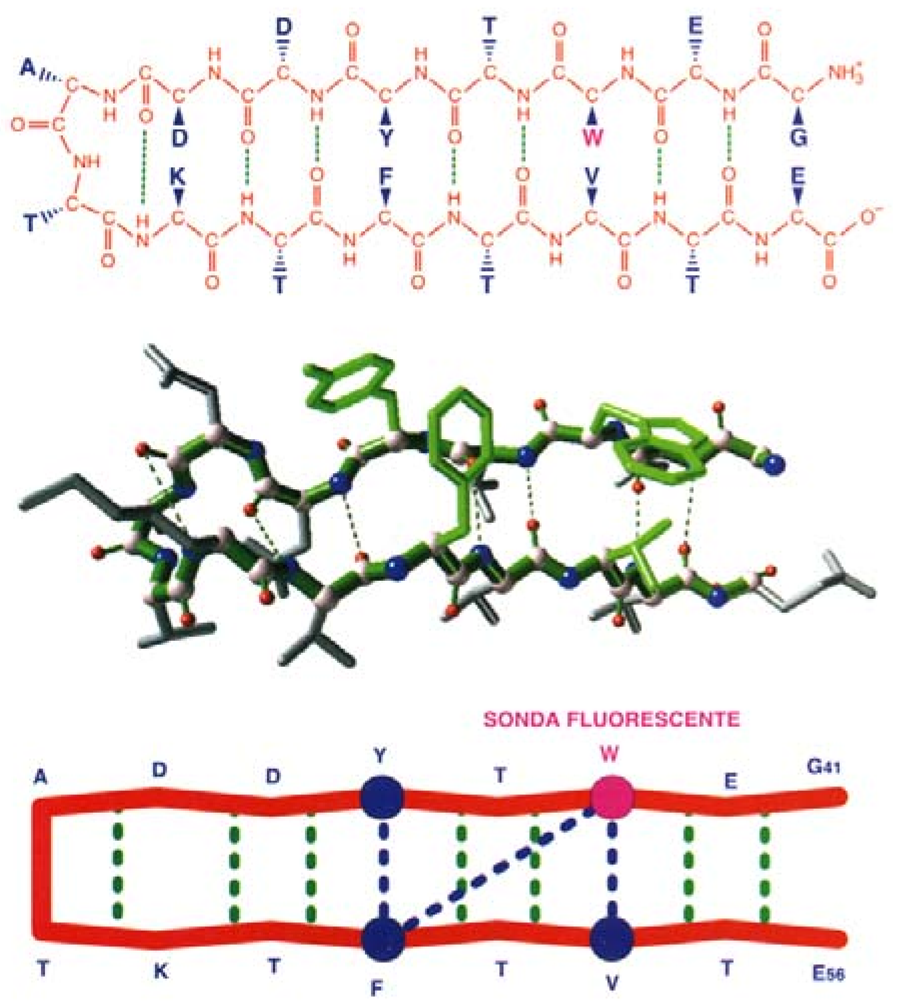
Ahora bien, aunque podemos determinar la estructura de una proteína por cristalografía de rayos X o resonancia magnética nuclear y analizar su función biológica mediante experimentos bioquímicos, no nos es dado todavía predecir su estructura y función a partir de la secuencia aminoacídica. Para ello se requiere comprender el plegamiento de proteínas, un proceso de gran complejidad.

Ante ese proceso, el biólogo se siente atraído por los intrincados patrones estructurales, el químico por la riqueza y especificidad de las interacciones que estabilizan la estructura de la proteína y el físico por la naturaleza de las fuerzas y los mecanismos del plegamiento.

El estudio experimental revela una imagen engañosamente sencilla. El proceso se comporta como una transición de dos estados: en razón de



1. Esquema del aparato de salto de temperatura inducido por láser. En este aparato usamos el modo fundamental de un láser Nd-YAG pulsado a un ritmo de 7 nanosegundos, transformado por una celda Raman en un pulso de luz a 1540 nanómetros para calentar el agua. La reacción de plegamiento se mide detectando la fluorescencia de restos aminoacídicos de triptófano excitados con un haz continuo a 264 nanómetros, obtenido con un láser de argón con frecuencia doblada dentro de la cavidad resonante



2. *Representación pseudoquímica de la horquilla beta empleada como sistema modelo y correspondiente a los 16 últimos residuos (41 al 56) del dominio B1 de la proteína de unión a inmunoglobulinas G de* Streptococcus *grupo G. Las cadenas laterales de los aminoácidos se han representado mediante el código de una letra* (arriba). *El centro corresponde a la estructura tridimensional de la horquilla beta determinada por resonancia magnética nuclear. El diagrama de la horquilla beta resalta las principales características estructurales: la posición en la molécula del residuo de triptófano que nos servía de sonda fluorescente, los siete puentes de hidrógeno* (verde) *y las tres interacciones hidrofóbicas* (azul), *estabilizadoras de la estructura plegada* (abajo)

las condiciones del entorno, las proteínas se encuentran o bien plegadas del todo o completamente deshilachadas. Esa situación impide sacar conclusiones estructurales sobre su mecanismo de plegamiento.

Para soslayar tal limitación, se puede analizar fragmentos de proteínas (péptidos) aprovechando la organización jerárquica de la estructura. Podría estudiarse primero la estructura secundaria de la proteína (hélices α, horquillas β, giros β y lazos), después la supersecundaria (organización topológica de varios elementos de estructura secundaria) y, por fin, la estructura terciaria (organización tridimensional) en péptidos cada vez mayores.

Pero hasta hace poco no se conocían suficientes secuencias peptídicas que formaran estructura secundaria por sí solas y sirvieran de sistemas modelo. A ello había que añadir las limitaciones técnicas de los medios disponibles, pues la formación de estructura secundaria es mucho más rápida que el tiempo muerto de las técnicas cinéticas tradicionales.

En el grupo de William A. Eaton, del norteamericano Instituto Nacional de la Salud en Bethesda, nos proponíamos abordar el estudio de la formación de estructura secundaria. Recurrimos al salto de temperatura inducido por láser, una nueva técnica de cinética ultrarrápida que Peggy Thompson había desarrollado en nuestro grupo (*véase la figura 1*).

En esta técnica se genera un salto de temperatura utilizando un pulso de luz láser en el infrarrojo a una frecuencia que se solapa con una de las bandas del espectro vibratorio del agua. Las moléculas de agua absorben esa energía y, casi instantáneamente, la liberan en forma de calor con el incremento consiguiente de la temperatura del medio. Con nuestro aparato producimos saltos de hasta 30 grados en 10 nanosegundos.

El aumento de temperatura provocado perturba el equilibrio conformacional del péptido, que se relaja hasta alcanzar su nueva posición de equilibrio. Para seguir la reacción de plegamiento detectamos fluorescencia resuelta en el tiempo, a partir de la excitación de triptófano. Este aminoácido, uno de los 20 que pueden entrar en la composición de las proteínas, es emisor de fluorescencia en el ultravioleta cercano.

Cuando nos embarcamos en este proyecto, se conocían ya con bastante pormenor las propiedades termodinámicas de la hélice. Se contaba también con algunos datos sobre su formación. Pero se ignoraba la termodinámica o cinética de la estructura beta. Decidimos estudiar su elemento más sencillo, la horquilla beta. Por sistema modelo elegimos un fragmento de 16 aminoácidos del extremo C-terminal de la proteína G (*figura 2*).

El fragmento escogido poseía un triptófano, convertido en sonda fluorescente, y formaba una horquilla a baja temperatura, de acuerdo con lo determinado de antemano por autores que emplearon resonancia magnética nuclear. Al estudiar las propiedades termodinámicas, descubrimos que la población de horquilla era máxima a la temperatura más baja accesible y disminuía al incrementar ésta.

Del análisis con salto de temperatura se desprendía una triple conclusión. La primera era que la formación de la horquilla ocurría en varios microsegundos, lo cual contrastaba con las hélices que se forman un orden de magnitud más rápido. En segundo lugar, la formación de la horquilla se hacía más lenta al aumentar la temperatura, en contraposición con lo que ocurre con la mayoría de las reacciones químicas. Finalmente, se observó también que la formación de la horquilla se com-

portaba como un proceso de dos estados; ello sugería que el estudio de este péptido podría desentrañar las claves del comportamiento de dos estados en el plegamiento.

Para ofrecer una explicación cuantitativa de esa triple observación, desarrollamos un modelo matemático basado en la mecánica estadística que relacionaba la estructura secundaria con las propiedades termodinámicas y cinéticas que podíamos medir. Al aplicar el modelo a la horquilla β y a la hélice α (con datos conseguidos en un estudio en paralelo) encontramos que la horquilla β es más lenta porque sólo se pliega bien desde el centro de la molécula, mientras que la hélice puede plegarse desde varios puntos a la vez.

El comportamiento de dos estados, por otro lado, parecía resultar de la descompensación durante el plegamiento entre la pérdida de entropía conformacional y la pérdida en energía al establecerse interacciones estabilizadoras.

Por último, encontramos que la velocidad de formación de la horquilla estaba determinada por el tiempo necesario para constituir un núcleo central de 8 residuos que se hallaba estabilizado por dos de los siete puentes de hidrógeno posibles, explicando por qué la reacción se volvía más lenta al incrementar la temperatura.

Los resultados revestían particular interés. Se trataba de la primera información experimental sobre la dinámica de los procesos básicos del plegamiento de proteínas. Abrían, además, una nueva vía de investigación. Con las nuevas técnicas de espectroscopia láser se pueden acometer experimentos novedosos, mientras que la existencia de un modelo físico-químico permite realizar predicciones cuantitativas que pueden luego ser comprobadas o rechazadas en el laboratorio.

VÍCTOR MUÑOZ
Laboratorio de Química-Física
Instituto Nacional de la Salud,
Bethesda

Dinámica celeste

La nebulosa del Antifaz

Parece lógico pensar que procesos tan antagónicos como el nacimiento y la muerte no tengan nada en común. Salvo que hablemos de estrellas. Los procesos físicos que se desarrollan alrededor de una estrella recién nacida o de una estrella agonizante no sólo son similares sino que podrían incluso engañarnos sobre la situación real de la estrella.

En 1995 descubrimos, olvidado en un atlas del cielo, el objeto que se muestra en la figura y nos propusimos descifrar si era una región HII (donde se ha producido formación estelar reciente), o una nebulosa planetaria (efímera fase previa a la muerte de una estrella).



Nebulosa del Antifaz

Nebulosas planetarias y regiones HII son nubes de gas extensas e ionizadas, que, observadas en el óptico, presentan colores similares. En ambas, su emisión se debe a la presencia de una estrella en el centro que emite fotones muy energéticos, capaces de arrancar sus electrones al gas de la nebulosa.

Las diferencias entre ambos tipos de regiones de emisión hay que buscarlas en el origen del gas ionizado y en la causa de la alta temperatura de la estrella central.

Se forma una nebulosa planetaria cuando una estrella poco masiva, en una de las últimas etapas de su vida, expulsa sus capas externas al medio interestelar y deja al descubierto el núcleo desnudo de la estrella que, muy caliente, ioniza su propia envoltura en expansión.

En el caso de una región HII, la fuente de fotones ionizantes es, por el contrario, una estrella muy masiva y con muy alta temperatura, aunque menor que la de una nebulosa planetaria, que acaba de nacer inmersa en la nube de gas y polvo a partir de la cual se originó. El gas ionizado es ahora parte de esa nube.

Para realizar un análisis detallado de las propiedades físicas y químicas de un objeto celeste y determinar su naturaleza, hemos de seguir ciertos pasos lógicos.

Antes de introducir las coordenadas de la nebulosa en un telescopio, hay que buscar información en bases de datos donde se almacena la emisión de todo el cielo en determinadas bandas del espectro electromagnético. La del satélite *IRAS* en el infrarrojo y la emisión en ondas milimétricas de la molécula de monóxido de carbono son de gran utilidad. La emisión en infrarrojo porque nos proporciona datos sobre la temperatura de los granos de polvo. Estos son partículas que absorben la radiación en el ultravioleta y visible reemitiéndola en el infrarrojo y suelen tener temperatura más alta en las nebulosas planetarias, ya que la fuente de radiación, o sea, la estrella, es más caliente.

Por otra parte, con las líneas del CO es posible detectar la emisión de la nube molecular (gas denso y frío donde nacen las estrellas) a la que están asociadas las regiones HII. Desgraciadamente, no se detecta ningún tipo de emisión asociada a nuestra nebulosa en ninguna de las dos bandas.

En consecuencia, se impone observar el objeto con un telescopio. En nuestro caso, debido a la posición de la nebulosa en el hemisferio sur, utilizamos el telescopio de 3,5 m del Observatorio de la ESO en La Silla (Chile). Allí tomamos imágenes CCD y espectros ópticos de media y alta resolución.

Nebulosas planetarias y regiones HII presentan espectros con líneas de emisión del hidrógeno (el elemento más abundante en el universo), el helio, el oxígeno o el nitrógeno. A partir de cocientes de intensidades de líneas de estos elementos químicos y de algunos otros, nos es posible determinar las condiciones de densidad y temperatura del gas, los elementos químicos presentes y la proporción en que se encuentran, además de la cuantía de luz absorbida por el medio interestelar. Utilizando el efecto Doppler, estableceremos la velocidad de expansión del gas y la celeridad con que se está desplazando la nebulosa entera en el seno de la Galaxia.

De todos los datos extraídos de los espectros, fundamentalmente dos nos aportaron la clave acerca de la naturaleza del objeto. Por un lado, la presencia de líneas de helio totalmente ionizado, pues ni siquiera las estrellas masivas más calientes en una región HII emiten el suficiente número de fotones en el ultravioleta para arrancar sus dos electrones al helio. Y, por otro, el elevado enriquecimiento químico del gas, sólo posible debido al procesamiento nuclear que aconteció en el interior de la estrella y a los procesos de mezclado que, a lo largo de su vida, llevan el material procesado al exterior.

Con todo ello, podemos afirmar que nuestra "nebulosa del Antifaz", como le hemos bautizado coloquialmente, es una nebulosa planetaria, es decir, la expresión más espectacular de la muerte de una estrella. Por su morfología, se encuadra dentro del grupo de las bipolares. Después de toda clasificación, es lógico comparar las propiedades del objeto con las del resto del grupo al cual pertenece. Pues bien, esta nebulosa planetaria recién descubierta no deja de sorprendernos. Además de presentar un notable enriquecimiento en helio y nitrógeno es, con un tamaño de 2,5 parsecs, una de las mayores, superando en dos veces la media de tamaño de las (menos de cien) nebulosas bipolares conocidas en la Galaxia. Si nos fijamos en su edad, más de 12.000 años, es también una de las más viejas descubiertas, aunque, sorprendentemente, no se ha diluido en el medio interestelar circundante, conservando su forma bipolar hasta hoy.

El estudio de objetos con propiedades tan extremas como la nebulosa del Antifaz proporciona información clave en el entendimiento de cuál será el futuro de estrellas de hasta diez veces la masa de nuestro Sol. Y, dando marcha atrás en el tiempo, quizá permita desentrañar alguna de las claves de los procesos de evolución estelar.

Eva Villaver Sobrino
Antonio Mampaso
Romano L. M. Corradi
Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), La Laguna
Mario Perinotto
Universidad de Florencia

Síndomes mielodisplásticos

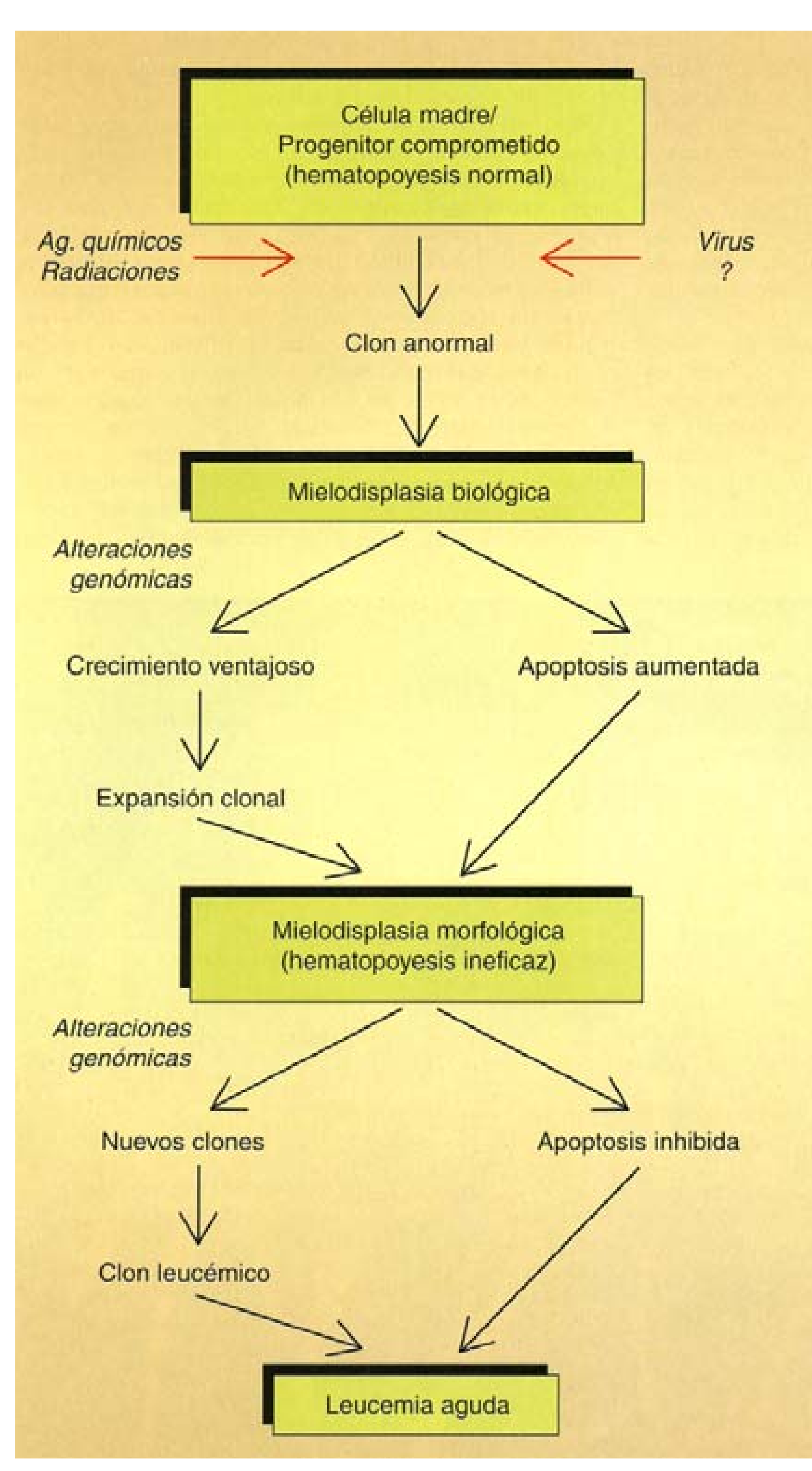
Confrontación entre proliferación ymuerte celular programada

Genéricamente se denominan síndromes mielodisplásicos (SMD) a un grupo heterogéneo de enfermedades hematológicas de naturaleza clonal que se caracterizan por mostrar anormalidades morfológicas (displasia) y numéricas (citopenias) de las células hematopoyéticas, tanto en la sangre como en la medula ósea. Dada la frecuencia con que desembocan en una leucemia aguda, se los conoce a menudo por "preleucemias" o "síndromes preleucémicos".

La incidencia de los SMD en los países desarrollados se estima en torno a 10 casos por 100.000 habitantes y año, siendo los ancianos el grupo de población más susceptible. Menos de un 10 % de los SMD se presentan antes de los 50 años. Aunque no existan datos epidemiológicos definitivos, parece que su incidencia ha aumentado en los últimos años, si bien cabe la posibilidad de que se trate de un aumento en los diagnósticos. Varios son los factores de ese incremento: mayor longevidad de la población, mejor conocimiento de los procesos y uso generalizado de análisis rutinarios de sangre.

Los síndromes mielodisplásicos no tienen una causa conocida. Ocasio-

nalmente se ha evidenciado cierta predisposición genética. También se ha demostrado su asociación a la exposición a la quimioterapia y a la radioterapia, que inducen la aparición de SMD secundarios. Se admite que son necesarias varias alteraciones genómicas para desencadenar el proceso hematológico. La alteración inicial en un gen de una célula hematopoyética muy primitiva produciría un clon con ventaja proliferativa (mielodisplasia biológica). Sucesivas agresiones genómicas darían lugar a subclones con un potencial de diferenciación celular restringido que escaparían a los mecanismos de control celular (mielodisplasia morfológica). En un paso final, una o varias alteraciones genómicas adicionales en uno de estos subclones provocaría la transformación leucémica.



Modelo hipotético de los diferentes eventos que ocurren en la patogénesis de los síndromes mielodisplásicos

La activación de un protooncogén o la inactivación de un antioncogén podrían intervenir también en la génesis de los síndromes mielodisplásicos. Se menciona, en particular, la activación inicial del protooncogén RAS en presencia de un antioncogén activo (IRF-1 o p53), que induciría, a un mismo tiempo, proliferación celular y apoptosis (muerte celular programada).

En la médula ósea de pacientes con SMD se ha evidenciado la coexistencia simultánea de una elevada tasa proliferativa y de un alto índice de apoptosis. Este modelo explicaría la hipercelularidad medular y la hematopoyesis ineficaz, características de los síndromes mielodisplásicos. En una fase más avanzada del proceso, la inactivación de un antioncogén conduciría a la transformación leucémica, al perderse el freno al crecimiento celular que suponía el aumento de la muerte celular programada.

Se reconocen ahora cinco subtipos de SMD: anemia refractaria (AR), AR con sideroblastos en anillo (ARSA), AR con exceso de blastos (AREB), AREB en transformación (AREBT) y leucemia mielomonocítica crónica (LMMC). A propósito de los síndromes mielodisplásicos secundarios a quimiorradioterapia, se subraya la mayor incidencia de anomalías cromosómicas complejas; se ha observado una asociación del empleo de agentes alquilantes y radioterapia con la monosomía o deleción de los cromosomas 5 y 7.

En la praxis médica se ha pasado de una actitud paliativa en una enfermedad irremediablemente fatal a la administración de tratamientos con potencial curativo, pues se ha avanzado en el conocimiento de los factores que determinan el pronóstico y en el campo del trasplante de progenitores hematopoyéticos (TPH). El progreso en la manipulación de los trasplantes facilita la administración de quimioterapia potencialmente erradicativa del clon neoplásico.

MIGUEL A. SANZ
y GUILLERMO F. SANZ
Servicio de Hematología,
Hospital Universitario La Fe,
Valencia.

De cerca

Texto y fotos: José Manuel Fortuño, Claude Carrè y Josep Maria Gili

Potentes filtradores

Salpas y doliólidos son tunicados pelágicos. Cumplen una misión singular y crítica en las comunidades planctónicas. Forman densas agrupaciones de miles de individuos, que podrían colapsar las redes de zooplancton. Mediante reproducción asexual, cada individuo, o blastozoide, genera por sí solo y en pocos días largas cadenas de más de un metro de longitud. Alcanza semejante tasa de crecimiento merced a su tasa excepcional de filtración.

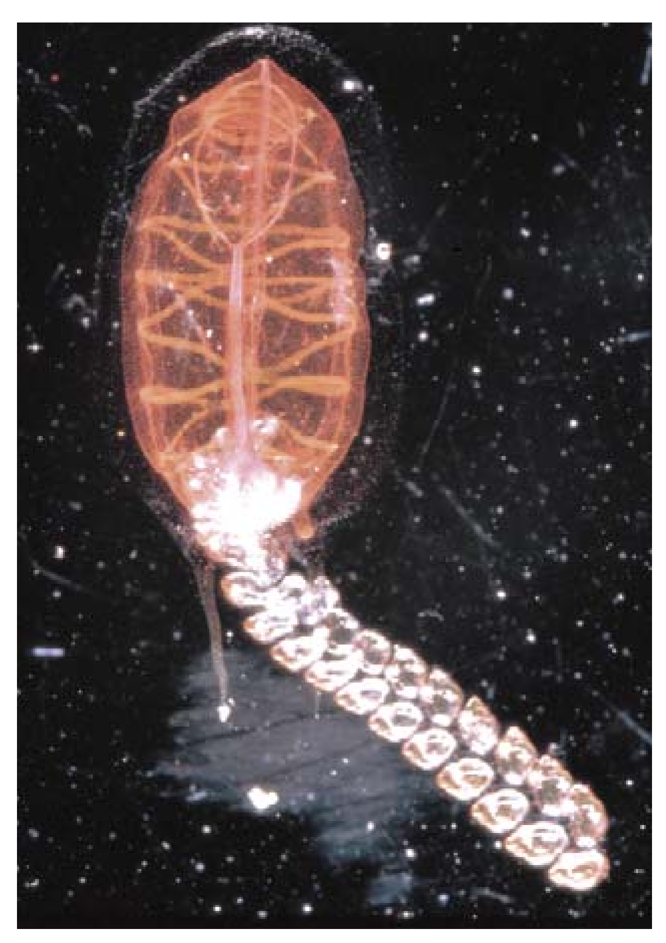
La salpa procesa varios litros de agua por hora. De la que circula en su entorno extrae y filtra todas las partículas pequeñas que contiene. El ritmo de filtración depende de la densidad y tamaño de partículas alimenticias que hay en el agua; en condiciones de oligotrofia la salpa no deja de filtrar en ningún momento. Lo hemos observado en las aguas antárticas, en donde la presencia de salpas impide la supervivencia de los copépodos o cualquier otro grupo de organismos filtradores.

Pero en esa tasa de filtración que les sirve para crecer y reducir el número de competidores encuentran su propio dogal. Su población cae en picado con el agotamiento de las fuentes nutricias. Se dividen en pequeños grupos errantes hasta que se recupera el fitoplancton, principal alimento potencial.

Pese a su apariencia gelatinosa, las salpas efectúan largas migraciones verticales, de más de 400 metros al día en algunos casos. Contraen las bandas musculares que recubren sus cuerpos y que son, al mismo tiempo, las responsables de los movimientos de bombeo para la filtración. Su interés en las cadenas tróficas marinas resulta de un comportamiento peculiar: compactan en forma de paquetes fecales gran cantidad de la producción de las capas superficiales, que caen rápidamente hacia el fondo.



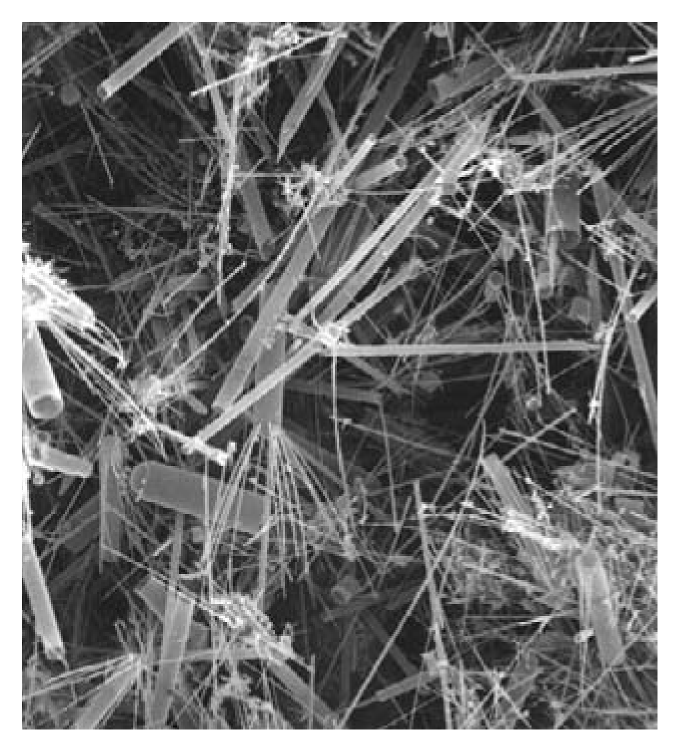
1. Varios ejemplares de oozoides de **Salpa maxima.** *No se han desprendido aún del estolón del blastozoide que las ha originado por reproducción asexual*

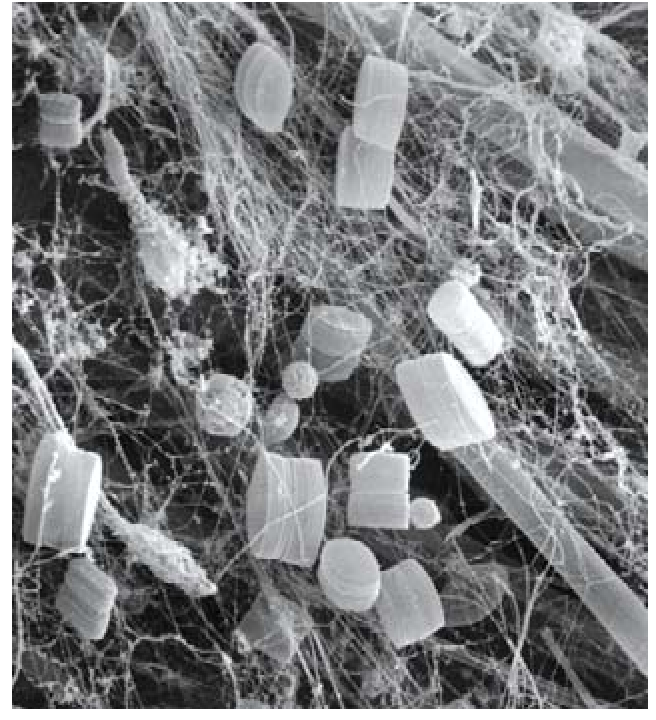


2. Colonia de Thalia democratica *con un blastozoide que arrastra el estolón con los oozoides en vía de gemación*



3. Individuo solitario de oozoide de Salpa fusiformis. *Se distinguen las fuertes bandas musculares que le sirven para el bombeo de agua y su desplazamiento*





4. Fotografías al microscopio electrónico del contenido estomacal de Salpa thompsoni *en aguas antárticas. Se aprecia una gran acumulación de diatomeas junto con fibras mucosas de la faringe de la salpa* (derecha) *y un empaquetamiento de algas del fitoplancton del género* Corethron

Hielo inflamable

Los cristales de hielo cargados de hidrato de metano que se encuentran en el subsuelo marino acumulan más energía que todas las reservas mundiales de crudo juntas. Pero estos depósitos de metano son muy frágiles y el gas que dejan escapar podría acentuar el calentamiento global de la atmósfera

Erwin Suess, Gerhard Bohrmann, Jens Greinert y Erwin Lausch





La emoción nos embargó cuando el enorme rastreador del fondo marino abrió sus fauces metálicas y vomitó su captura sobre la cubierta del *Sonne*. Una sustancia blanca, como nieve efervescente, brilló entre el lodo oscuro extraído del fondo del Pacífico Norte. Al ver cómo se fundía ante nuestros ojos, sentíamos la sensación de quien se encuentra un tesoro.

Si confesamos nuestra adscripción al Centro de Investigaciones Geomarinas (GEOMAR) de la Universidad Christian Albrechts de Kiel, se entenderá que buscáramos hidrato de metano, un compuesto parecido al hielo y formado por moléculas de gas metano atrapadas en cristales de agua congelada. Hasta aquel momento, habíamos emprendido varias expediciones para inspeccionar, mediante una cámara de vídeo fijada al barco, una cadena submarina a unos 100 kilómetros de la costa de Oregón. Las perforaciones e investigaciones sísmicas anteriores abonaban la posibilidad de encontrar allí un filón de nuestro tesoro. El 12 de julio de 1996 observamos manchitas blancas en lodo sedimentado a 785 metros de profundidad. Para asegurarnos de que se trataba de un indicio real de hidratos de gases, recogimos abundante cantidad de material del fondo con nuestro rastreador, un artilugio parecido a una excavadora de dos palas. Al retirar la carga vimos confirmada nuestra sospecha. Conforme se izaba la carga, la cámara instalada en el rastreador nos revelaba que las burbujas, dando fe de la rápida fuga del gas metano, empezaban a emerger de la masa de lodo. Los hidratos de metano son estables sólo a temperaturas cercanas al punto de congelación y a las altas presiones generadas por el peso de una columna de agua suprayacente de al menos 500 metros; se descomponen presto a profundidades menores. A medida que la muestra se acercaba a la superficie, se incrementaba el flujo de burbujas, que estallaban en la superficie del agua mucho antes de que emergieran las palas del rastreador.

Nos sorprendió comprobar cuánto hidrato llegaba intacto a cubierta. Actuando con presteza, logramos salvar 45 kilogramos de este material silbante en recipientes enfriados con nitrógeno líquido. No dio tiempo a guardarlo todo, gracias a lo cual nos fue dado asistir a un espectáculo de fuegos artificiales inesperado. Bastó con acercar una cerilla a uno de los pedazos blancos para que prendiera el hidrato de metano, un hidrocarburo que constituye uno de los principales componentes del gas natural. El pedazo ardió con una llama rojiza; sólo quedó un charco de agua como prueba de su gloria ida.

Hasta 1970 se ignoraba que hubiera hidrato de metano bajo el mar. De hecho, la cantidad que recogimos no ha sido igualada, aunque los hidratos han dejado de considerarse una rareza. En años recientes se ha ido corroborando su presencia por todo el planeta. De Japón a New Jersey y de Oregón a Costa Rica, en cantidades ingentes. Aunque las estimaciones varían mucho, los expertos están de acuerdo en que los gases hidrato de las profundidades submarinas duplican el contenido en carbono encerrado en todos los depósitos de gas natural, petróleo y carbón mineral de la Tierra.

La energía almacenada en los hidratos de metano podría abastecer las futuras necesidades de combustible del planeta, siempre que se desarrollaran técnicas adecuadas de

1. BURBUJAS DE METANO que escapan de un promontorio de gas hidrato en descomposición, rodeado de gusanos tubícolas. Estos depósitos de hidrato crioforme se vuelven inestables cuando la temperatura ambiental aumenta unos grados por encima del punto de congelación o cuando la presión es menor que la habitual a unos 500 metros de profundidad.







2. EL BUQUE OCEANOGRAFICO *SONNE* (*arriba*) ha realizado varias exploraciones del hidrato de metano frente a las costas de Oregón. En el verano de 1996 los investigadores izaron sedimentos de un campo de hidratos de metano con la ayuda de un rastreador provisto de una cámara de vídeo (*abajo, izquierda*). Los pedazos de lodo (*abajo, derecha*) consisten en capas alternantes de hidrato de metano blanco, calizas y otros sedimentos.

extracción. Pero los hidratos de gases tienen su lado obscuro. La fuga de metano procedente de la perturbación de los hidratos submarinos puede acabar resultando un peligro para el ambiente. Bastaría que una mínima parte de los depósitos se descompusiera por procesos naturales para que se liberaran ingentes cantidades de metano que intensificarían el efecto invernadero y el calentamiento global de la atmósfera.

Aunque el período de residencia del metano en la atmósfera sea bastante corto, una media de diez años, no puede decirse que desaparezca sin más. En presencia de oxígeno libre, el carbono monoatómico de las moléculas de metano se desprende de los cuatro átomos de hidrógeno y forma dióxido de carbono, el gas de efecto invernadero con peor reputación debido a que se arroja a la atmósfera en la quema de combustibles fósiles.

¿Contribuyen hoy los hidratos de metano en descomposición al calentamiento global? ¿Lo harán en el futuro? Nuestra expedición oceanográfica de 1996, y con ella las decenas de expediciones y experimentos que le han seguido, reveló algunos aspectos de la estructura y origen de varios de estos depósitos ingentes, aunque muy inestables. También obtuvimos algunas respuestas a los interrogantes planteados sobre el clima, si bien queda mucho por averiguar. Con nuestros colegas del GEOMAR, continuamos investigando el papel que desempeñan los hidratos de metano en la estabilidad del fondo marino y su intervención en los cambios climáticos pasados y futuros.

Llamando la atención

La inmensa reserva de energía atrapada en los hidratos de metano marinos llamó la atención de los políticos, interés que decayó en cuanto se pusieron de manifiesto los obstáculos que plantea el beneficio de ese recurso. Los hidratos tienden a formarse a lo largo de los márgenes más bajos de los taludes continentales, allí donde el fondo marino desciende desde unos 150 metros de profundidad hasta los varios kilómetros de las fosas abisales. Los depósitos de hidrato se encuentran centenares de metros más abajo, en el subsuelo marino, a una profundidad superior a la que pueden operar las plataformas petrolíferas. Súmase al inconveniente de la profundidad el carácter abrupto del relieve submarino, que dificulta la instalación de gaseoductos hasta la costa.

Sin embargo, los países que desean reducir su dependencia de los combustibles fósiles importados han empezado a buscar los medios para superar tales dificultades. Japón emprenderá en breve un proyecto experimental de explotación de hidratos en el mar de Hokkaido. Hay ingenieros estadounidenses especulando con distintas vías para aprovechar la energía almacenada en los hidratos. Cabe esperar, pese a todo, que los países industrializados no invertirán en técnicas para el aprovechamiento eficiente de los hidratos mientras dispongan de gas y petróleo a un precio relativamente bajo.

Los hidratos de metano atrajeron la atención de los geólogos algo antes que la de los políticos. Cuando, en los años treinta, los ingenieros se percataron de que estos cristales de hielo cargados de gas obstruían sus gaseoductos, los científicos emprendieron el estudio de su estructura y composición. Averiguaron, por ejemplo, que una estructura particular del hidrato consistía en jaulas heladas, capaces de absorber pequeñas moléculas de los gases metano, dióxido de carbono o sulfuro de hidrógeno. Otra clase de estructura forma grandes cavidades que pueden acoger tanto diversas moléculas pequeñas como hidrocarburos de moléculas mayores tales como el pentano. Es más, las jaulas pueden diferir entre sí por lo que respecta a los tipos de gases atrapados.

En los sesenta se descubrió que los hidratos podían formarse de un modo natural. Los primeros depósitos naturales aparecieron en el permafrost de Siberia y Norteamérica; allí se les

ERWIN SUESS, GERHARD BOHRMANN y JENS GREINERT trabajan en el departamento de geología ambiental del Centro de Investigaciones Geomarinas de Kiel. Suess ha dirigido el departamento desde su fundación en 1988. Bohrmann está al cargo de la extensa colección de muestras de sedimentos marinos del centro. Greinert es un investigador posdoctoral. Juntos constituyen uno de los grupos punteros en la investigación del hidrato de metano y los salideros helados. ERWIN LAUSCH es miembro del consejo asesor del centro de investigación.

llamó gas de los pantanos. Transcurrido un decenio, George Bryan y John Ewing, del Observatorio Geológico Lamont-Doherty, dieron con la primera prueba de la acumulación de hidratos de metano bajo el fondo marino. La señal provenía de estudios sísmicos en la montaña de Blake, una cadena montuosa de 100 kilómetros de longitud ante la costa de Carolina del Norte.

Para distinguir las capas subyacentes bajo el fondo marino, los sismólogos se apoyan en las ondas sonoras, que se reflejan de manera distinta según el tipo de lodo y roca. A unos 600 metros de profundidad del subsuelo oceánico, Bryan y Ewing observaron una refracción insólita, que imitaba el contorno de la cadena; dedujeron que se trataba del límite entre una capa de hidrato de metano y otra subyacente de metano libre acumulado. Se descubrieron fenómenos similares en otros lugares. Muy pronto, empezó a cartografiarse esa clase de reflexión como depósitos de hidrato de metano en las cuencas oceánicas.

Llegamos a 1996. Utilizamos un reflector simulador de fondo y cámaras de vídeo submarinas para localizar hidrato de metano a lo largo de un promontorio en el fondo del Pacífico Norte, que desde entonces se llama cresta del Hidrato. Nuestro éxito en la recuperación de hidrato intacto en la expedición mencionada ha permitido estudiar en detalle, por primera vez, este extraño compuesto. A través del análisis de la textura y la química de su estructura microscópica se ha confirmado la idea plausible, aunque hasta entonces no probada, de que el metano deriva de la descomposición microbiana de la materia orgánica depositada en los sedimentos.

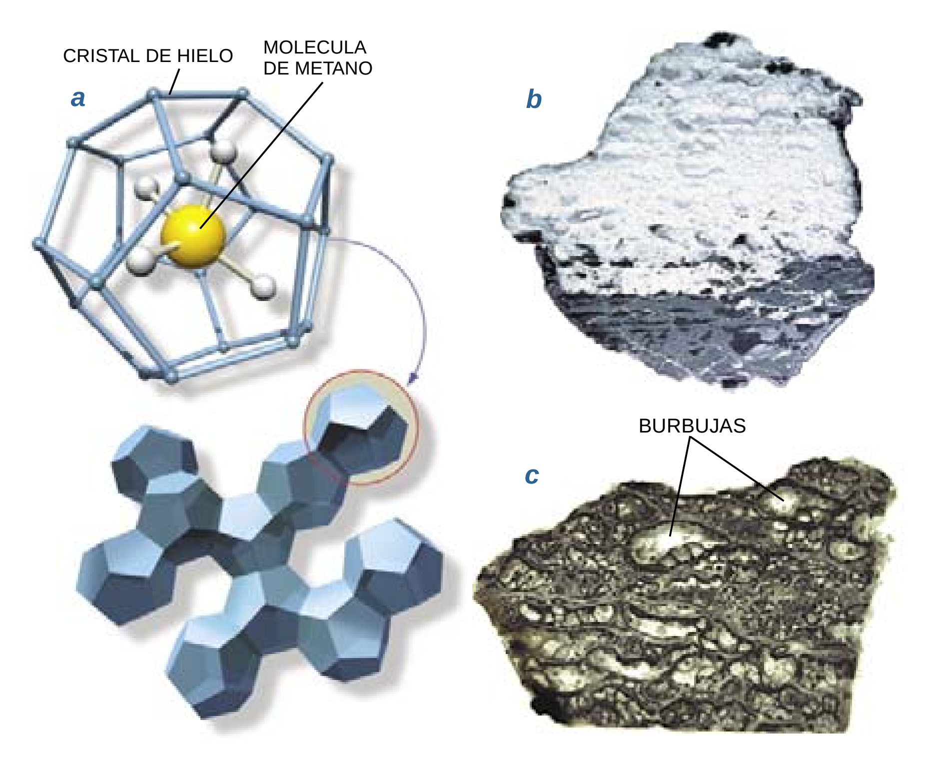
Mayor información aportaron los análisis químicos que revelaron el enriquecimiento de los hidratos en carbono 12. El metano que se filtra al exterior desde las cadenas volcánicas y otras grietas presenta mayores niveles de carbono 13, un isótopo del carbono que tiene un neutrón adicional. En cambio, las bacterias que digieren materia orgánica en condiciones anóxicas, como las existentes en los sedimentos del fondo marino, tienden a secuestrar más carbono 12 en el metano que producen.

El fondo marino sito frente a las costas de Oregón constituye un teatro de operaciones especialmente fructífero para evaluar la estabilidad de los depósitos de hidrato de metano y su papel potencial en la liberación de carbono a la atmósfera. Sumados a otras investigaciones, estos análisis indican que los depósitos de hidrato de metano pueden resultar de una inestabilidad inquietante.

Sabemos ahora que a lo largo de la cresta del Hidrato hay lugares donde el fondo marino está virtualmente cubierto de centenares de metros cuadrados del compuesto que le da nombre. Tales depósitos forman parte de un paquete de sedimentos encabalgado sobre la placa tectónica de Juan de Fuca; ésta se desplaza bajo la placa de Norteamérica a un ritmo de 4,5 centímetros por año. A medida que la placa de Juan de Fuca subduce, los sedimentos e hidratos que desplaza con ella son cercenados parcialmente por la placa suprayacente, comprimidos en forma de pliegues o apilados en columnas de varias capas de altura, parecidas a gigantescas torres de pastel. El material deformado configura una cuña de lodos que se acumulan contra la placa de Norteamérica, en forma de crestas casi paralelas a la costa.

Penachos de metano

Erwin Suess observó, en 1984, las crestas de hidrato de metano y su mundo de noche fría y eterna desde el *Alvin*, el sumergible oceanográfico propiedad de la Institución Woods Hole. Desde la escotilla del *Alvin*, Suess contempló un paisaje de chimeneas de piedra construidas por minerales precipitados, procedentes de los penachos de agua y gas que emanan de la corteza terrestre. Sólo más tarde comprendimos que estas chimeneas eran producto, en parte,



3. JAULAS CRISTALINAS DE AGUA CONGELADA (*a*) atrapan las moléculas de gas metano producido por la digestión microbiana de la materia orgánica presente en el lodo del fondo marino. La muestra de hidrato que aparece arriba (*b*) se formó a unos metros bajo el fondo marino frente a las costas de Oregón, donde las burbujas ascendentes de gas metano quedaron atrapadas en las capas más densas de lodo. El metano reaccionó con el agua próxima al punto de congelación para formar hidratos. En otra sección de la misma muestra de hidrato de metano (*c*), pulida en frío, se distinguen con nitidez las burbujas lenticulares.

¿Combustible del futuro?

Habida cuenta de la magnitud de los depósitos marinos de hidrato de metano, que duplica de lejos las reservas de carbono de todos los combustibles fósiles juntos, no debe extrañarnos el interés mostrado por los gobiernos y las empresas de gas natural y petróleo para aprovechar esta fuente de energía. Ya existen algunos programas de investigación y desarrollo en varios países, sobre todo en el Japón. Pero la explotación de tan ingente reserva energética resulta todavía muy costosa y está preñada de dificultades.

Una nada despreciable, su ubicación. Los depósitos de hidrato de metano se encuentran en el lodo oceánico a profundidades de hasta un kilómetro bajo el fondo marino. Además, los hidratos se descomponen muy rápidamente al apartarlos de las condiciones de temperatura y presión de las grandes profundidades marinas. Aunque los ingenieros lograran desarrollar un sistema para obtener el hidrato sin que éste se descompusiera, la propia extracción del metano de la matriz de lodo y roca presentaría otra dificultad.

El gas metano atrapado bajo una capa de hidrato tampoco se puede beneficiar de manera sencilla. No comparte las condiciones que se dan en los depósitos de gas natural al uso; la presión del agua y las rocas suprayacentes es demasiado baja para expulsar el metano a una velocidad de extracción que resulte rentable.

Pero el hidrato de metano no está del todo fuera de nuestro alcance. Aprovechando métodos similares a los empleados en la extracción del petróleo, denso y viscoso, se podría bombear vapor o agua por una tubería para fundir el hidrato y permitir que escapara más metano. Entonces se podría bombear el metano desde el fondo marino hasta la superficie por otra tubería. A la larga podría extraerse el metano, pero los gaseoductos submarinos son muy caros y las avalanchas en el talud continental los pondrían en peligro. La explotación de los hidratos que ayudan a estabilizar el talud aumentaría el riesgo.

La magnitud de las dificultades de aprovechamiento se refleja en algunas de las intrépidas propuestas de explotación que plantean los expertos en la materia. Timothy Collett, del Servicio Geológico de los Estados Unidos en Denver, propone ahorrar el coste de los gaseoductos licuando el gas en barcos o en plataformas de sondeo. En el proyecto de Collett el metano se quemaría en parte para obtener hidrógeno y monóxido de carbono. Luego, un catalizador convertiría la mezcla en un hidrocarburo líquido, de fácil transporte en barco. El talón de Aquiles de esa propuesta está en el 35 por ciento de energía que se pierde.

Roger Sassen, de la Universidad A&M de Texas, aboga por una instalación de beneficio en el mismo fondo oceánico, donde el metano ascendente se combinaría con agua para formar hidrato libre de contaminación de lodo y materiales rocosos. Los submarinos se encargarían de transportar el hidrato en tanques hasta aguas más someras, donde se descompondría en agua y combustible.

Según Sassen, “en el nuevo siglo veremos el hidrato de gas convertido en un recurso importante y ecológico”. Conforme mermen las reservas mundiales de energía, las compañías explotadoras se verán obligadas a invertir en técnica para el aprovechamiento de la mayor reserva planetaria de combustible fundada en el carbono.

—E.S., G.B., J.G. y E.L.



LA LLAMA ROJIZA que consume la muestra de hidrato se alimenta del metano atrapado en el hielo.

de un depósito de hidrato de metano comprimido por el avance de una placa tectónica sobre otra.

A lo largo de las fallas que cortan los hidratos de gas y otros sedimentos emergen también penachos de gas y fluidos. Conocidas por salideros helados, estas plumas difieren de los manantiales hidrotermales que se forman a lo largo de las dorsales mesooceánicas (lugares donde la lava fluye al exterior desde una fractura del fondo marino), pero son suficientemente calientes para desestabilizar los hidratos, que se funden cuando la temperatura de los alrededores se eleva tan sólo unos grados por encima del punto de congelación. A medida que se van formando más hidratos en la vecindad del suelo marino, las partes más bajas se funden en el agua, dando como resultado un desplazamiento ascendente del conjunto de la capa.

La fusión del fondo de la capa de hidrato libera agua, metano y pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno y amoníaco. Su oxidación en dióxido de carbono, sulfatos y nitratos aporta nutrientes a florecientes comunidades de bacterias. A su vez, tales colonias alimentan bivalvos y gusanos tubícolas. No habría ese oasis de vida sin las condiciones peculiares del fondo marino descrito.

De nuestras investigaciones se desprendía que los gases liberados en esos salideros densamente poblados dan lugar a una circulación del carbono muy activa. La oxidación del metano liberado genera bicarbonato, que se combina con los iones de calcio del agua del mar para constituir carbonato cálcico, la roca caliza que Suess observó en 1984 en forma de chimeneas y tapizando los salideros de la cresta del Hidrato. Hoy sabemos que la roca caliza es un signo de una capa de hidratos más profunda.

A lo largo de la vertiente oeste de la cresta del Hidrato, hay enormes bloques de calizas que cubren la fisura creada por una gran falla. Pese al recubrimiento de calizas y a la actividad de los organismos de los salideros, se filtran al agua circundante cantidades copiosas de metano. Hemos medido concentraciones 1300 veces superiores a las que contiene el agua en equilibrio con el metano

atmosférico. Todavía desconocemos cuánto metano se oxida en el agua y cuánto penetra en el aire, pero no es difícil imaginar que un terremoto o cualquier otra perturbación tectónica podrían liberar a la atmósfera ingentes cantidades de este gas de potente efecto invernadero.

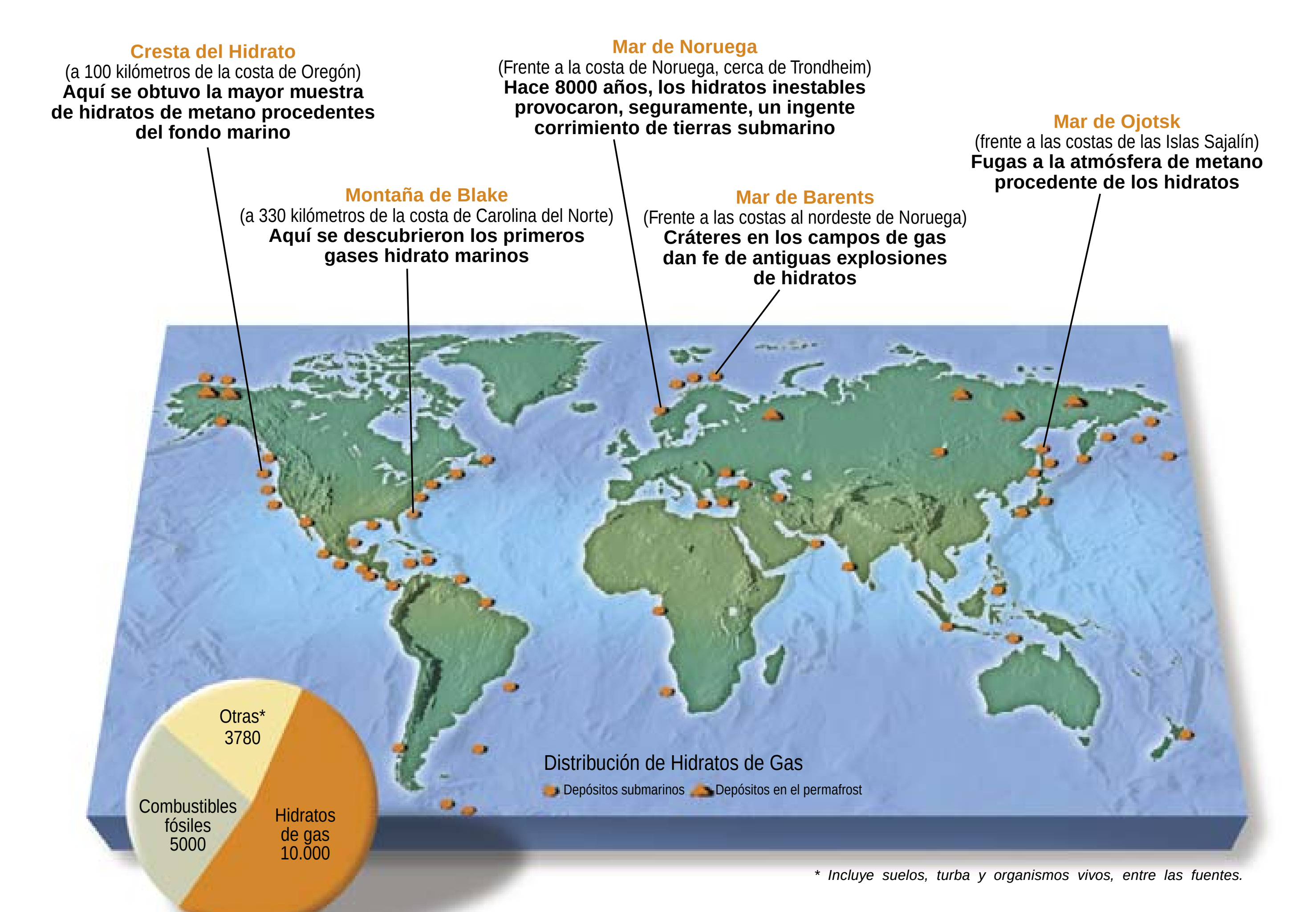
Los investigadores de GEOMAR conocen mejor cuánto metano escapa en los penachos que ascienden desde los depósitos de hidratos del mar de Ojotsk, frente a la costa oriental de Asia. De la magnitud del mar del Norte y el mar Báltico juntos, dicha masa de agua está limitada por la península de Kamchatka y el arco de las islas Kuriles. En el verano de 1998 un equipo germano-ruso, equipado con un sonar localizador de bancos de pesca, registró la ascensión de penachos de metano de unos 500 metros de altura desde los depósitos de hidrato de metano submarinos. Con nuestra cámara de vídeo articulada en el barco, observamos gigantescas chimeneas que recordaban las de los salideros helados de la cresta del Hidrato.

No teníamos aún prueba ocular de los depósitos de hidratos y ya sabíamos que se acumulaban enormes cantidades de metano bajo el banco de hielo que durante siete meses al año cubre una zona extensa del mar de Ojotsk. En la expedición de 1991 medimos, inmediata al hielo, una concentración de 6,5 mililitros de metano por litro de agua. Llegado el verano, con el agua exenta de hielo, la cuantía bajaba a 0,13; la diferencia se había escapado a la atmósfera. En ningún otro lugar del mundo se ha observado un flujo de metano similar; cabe, pues, que se tratase de un fenómeno único. Aun así, nuestra medición singular de liberación atmosférica de metano en el mar de Ojotsk demuestra sin ambages que los hidratos de metano submarinos constituyen, a buen seguro, una fuente importante del metano atmosférico. Para una mejor evaluación del impacto, actual y futuro, del metano sobre el clima, se está midiendo cada dos meses la concentración del gas en el agua del mar de Ojotsk.

Suelo inestable

Los penachos provocados por la fracturación del fondo marino y la descomposición natural de los hidratos arrojan lentamente metano a la atmósfera. A veces, sin embargo, el proceso resulta mucho más explosivo. En el verano de 1998, investigadores del Instituto Shirshov de Oceanografía, de Moscú hallaron campos de hidratos inestables frente a las costas occidentales de Noruega. En su opinión, podrían ser los causantes de la fuga de metano más impresionante de la historia. Estamos hablando del corrimiento de tierras submarino de Storrega.

Por lo observado en exploraciones del fondo marino realizadas con an-



4. LOS DEPOSITOS DE HIDRATO que contienen metano y otros gases se extienden por todo el planeta, en el subsuelo marino y en las regiones continentales del permafrost (*mapa*). Los hidratos contienen más carbono orgánico que cualquier otra reserva mundial (*gráfico*).

Del fondo del mar al cielo

ASI ALTERAN EL CLIMA LOS HIDRATOS DE METANO

Los depósitos de hidrato contribuyen al calentamiento global mediante la liberación gradual a la atmósfera (1-5) de metano, un gas de efecto invernadero, o mediante fugas catastróficas de metano procedente de los hidratos. Se forma hidrato cuando las burbujas de gas que se filtran por los sedimentos del fondo marino quedan atrapadas bajo las capas de lodo suprayacentes, más densas. En este entorno de altas presiones, el metano acumulado reacciona con el agua cercana al punto de congelación formando hidratos en los intersticios de los sedimentos.

—La redacción

terioridad, se calcula que, hace 8000 años, unos 5600 kilómetros cúbicos de sedimentos se desplazaron unos 800 kilómetros desde el extremo superior del talud continental hasta la cuenca del mar de Noruega, a la latitud de Trondheim. Las consecuencias de tamaño torrente de lodos presionando el agua a su paso habrían sido devastadores tsunamis, olas monstruosas que en cuestión de segundos arrasan la línea de costa.

De la presencia de depósitos de hidratos de metano en la misma región del fondo marino se colige que el desprendimiento se originó por la descomposición rápida de hidratos inestables, instada por un cambio de temperatura o presión acontecido tras la última glaciación. Al retroceder los glaciares, el fondo oceánico dejó de soportar el enorme peso del hielo, con la consiguiente distensión del suelo. Esta indujo el calentamiento del mar y el hielo suprayacentes, por cuya razón se volvieron más someros y desplazaron de su zona de estabilidad a los hidratos en un proceso súbito.

¿Puede repetirse un episodio geológico de ese tenor? Parece que el riesgo de nuevos desprendimientos frente a la costa meridional de Noruega es bastante exiguo, pues los depósitos de hidratos ya se han descompuesto en su mayor parte. No obstante, la estabilidad del talud continental está adquiriendo importancia con relación al actual calentamiento global y a la posibilidad de nuevos cambios en el clima del planeta en un futuro cercano. Amén de fomentar el desarrollo de tsunamis, las formaciones de hidratos que se vuelvan inestables y se descompongan liberarán metano a los océanos. La fusión de un solo metro cúbico de hidrato libera más de 164 metros cúbicos de metano, una fracción del cual llega a la atmósfera. Si añadimos que un calentamiento de la baja atmósfera calentaría los océanos, asistiríamos a un círculo vicioso de mayor disolución de hidratos y, por ende, mayor calentamiento de la atmósfera.

Sostienen algunos que la liberación explosiva de metano procedente de un yacimiento ingente provocaría cambios drásticos en el clima en un breve intervalo de tiempo. James P. Kennett, de la Universidad de California en Santa Bárbara, plantea la hipótesis de que las erupciones catastróficas de metano pudieron desencadenar un incremento notable de la temperatura durante algunos decenios de la última glaciación, hace unos 15.000 años. Un equipo internacional, dirigido por Jürgen Mienert, entonces en el GEOMAR y hoy en la Universidad de Tromsø, podría haber dado con una prueba de dicha liberación en el suelo del mar de Barents, en la punta noreste de Noruega.

Hay allí gigantescas depresiones, semejantes a cráteres producidos por bombas, que delimitan depósitos de hidratos de metano. El equipo de Mienert midió la mayor de esos cráteres, de 700 metros de ancho por 30 de hondo, unas proporciones que dan fe de varias explosiones catastróficas de metano. No se sabe todavía si las explosiones ocurrieron de manera más o menos simultánea, pero las fallas y otras pruebas estructurales indican que probablemente tuvieron lugar al final de la última glaciación, tal y como había propuesto Kennett. Las explosiones siguieron la pauta sugerida como causa del corrimiento de Storrega: mares de aguas progresivamente más calientes volvieron inestables a los hidratos, y éstos, al alcanzar un punto crítico, estallaron como un volcán.

Vestigios más antiguos

Se han descubierto pruebas de que el metano liberado de los hidratos afectó al clima global a finales del Paleoceno, hace unos 55 millones de años. De acuerdo con el registro fósil, la temperatura del mar y los continentes habría aumentado, en un salto brusco, durante ese período. Se extinguieron muchas especies unicelulares del fondo marino. Al parecer, la penetración en la atmósfera de algún gas de efecto invernadero calentó el planeta ¿De dónde procedía? Los isótopos de carbono encierran la clave para averiguar la causa del repentino ascenso de temperatura.

Se ha hallado un incremento apreciable de la concentración de carbono 12 en las conchas conservadas de seres microscópicos que sobrevivieron al súbito aumento del calor. Los hidratos de metano son la fuente más probable del carbono 12 y del flujo de gas de efecto invernadero. Ahora bien, sólo en esos yacimientos el metano orgánico se acumula hasta niveles que, al fundirse, pueden hacer variar la composición isotópica del agua del mar. El carbono 12, característico de los hidratos, se dispersa en el agua de mar con el metano liberado y persiste en forma de su producto de oxidación, el dióxido de carbono. Parte de este dióxido de carbono se incorpora al carbonato cálcico de las conchas, mientras que parte del metano alcanza la atmósfera y contribuye al calentamiento global.

Gerald Dickens calculó, mediante simulación informática, si los hidratos de metano fundidos podrían haber arrojado gases de efecto invernadero en cuantía suficiente para provocar el choque térmico de hace 55 millones de años. Con su grupo de la Universidad de Michigan, elaboró una simulación a partir del supuesto de que entonces se descompusiera una cantidad equivalente al 8 por ciento de las reservas actuales. En su rastreo se ciñeron al dióxido de carbono, por la sencilla razón de que el metano se convierte inmediatamente (a escala geológica) en dicho compuesto.

En la simulación, cada año, a lo largo de un período de 10.000 años, llegaban a la atmósfera 160 kilómetros cúbicos de dióxido de carbono enriquecido en carbono 12. Ese dióxido adicional incrementaba, en dos grados Celsius, la temperatura de la baja atmósfera. Al mismo tiempo, la proporción de isótopos de carbono en el agua y la atmósfera cambiaba hasta alcanzar los valores observados en los fósiles. Se tardaban 200.000 años en devolver la proporción de isótopos a sus niveles normales, confirmando lo que se desprendía del registro fósil.

El modelo de Dickens, aunque sólido, se aparta de lo habitual. Por ahora, los modelos climáticos globales otorgan escasa importancia, entre los gases de efecto invernadero, al metano procedente de fuentes naturales de hidratos. Tampoco se ha tenido en cuenta la contribución de los hidratos de metano en los cálculos globales de carbono.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FLUID VENTING IN THE EASTERN ALEUTIAN SUBDUCTION ZONE. Erwin Suess et al. en *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth Planets*, vol. 103, n.º B2, páginas 2597-2614; 10 de febrero, 1998.

GAS HYDRATES: RELEVANCE TO WORLD MARGIN STABILITY AND CLIMATE CHANGE. Dirigido por J. P. Henriet y J. Mienert. *Geological Society Special Publications*, vol. 137; 1998.

POTENTIAL EFFECTS OF GAS HYDRATE ON HUMAN WELFARE. Keith A. Kvenvolden en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 96, n.º 7, páginas 3420-3426; 30 de marzo; 1999.

EL SINO DE LA VIDA EN EL UNIVERSO

Hace miles de millones de años, el universo, demasiado caliente entonces, no podía albergar la vida. Llegará un momento en que se habrá hecho tan frío y ralo, que la vida, por muy inteligente que sea, perecerá

Lawrence M. Krauss y Glenn D. Starkman

La vida eterna es creencia central en muchas religiones. A menudo se la asocia a un Valhalla espiritual, una existencia sin dolor, muerte, preocupaciones o males, un mundo distinto de la realidad física. Pero existe otra clase de vida eterna que anhelamos, una en el reino temporal. Escribía Charles Darwin en el epílogo de su libro *Sobre el origen de las especies*: "Puesto que todas las formas de vida presentes son descendientes por línea directa de las que vivieron antes del período cámbrico, podemos estar seguros de que la sucesión ordinaria por generación no se ha cortado nunca... Por tanto, podemos contemplar con alguna confianza la seguridad de un dilatado futuro."



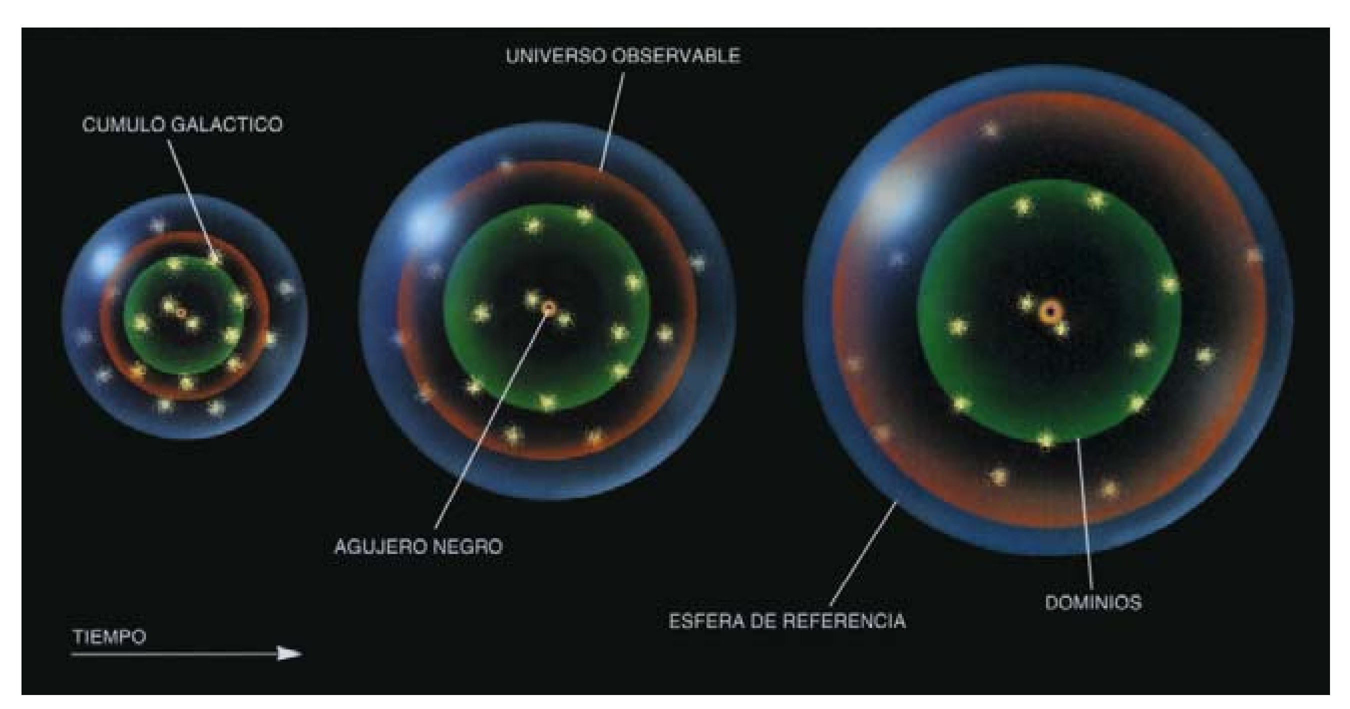
1. LOS HITOS EN EL CAMINO A LA ETERNIDAD comienzan con el estallido inicial y pasan por el nacimiento y muerte de las estrellas (*línea del tiempo al pie*). A medida que se extingan las últimas estrellas, los seres inteligentes necesitarán nuevas fuentes de energía, tales como las cuerdas cósmicas (*arriba*). Lamentablemente, los procesos naturales —tales como los brotes de agujeros negros— roerán estas concentraciones lineales de energía, forzando finalmente a las formas de vida a que se busquen otro sustento, si es que pueden encontrarlo. Como los procesos que rigen el universo actúan en escalas de tiempo que varían ampliamente, es mejor representar la línea del tiempo en escala logarítmica. Si el universo se está expandiendo a un ritmo acelerado, otros efectos (*mostrados en azul sobre la línea del tiempo*) volverán la vida aún más miserable.

El espacio y el tiempo se separan

Inflación cósmica

10^{-44} segundos transcurridos desde la gran explosión

10^{-28} segundos transcurridos desde la gran explosión



2. LA ESTRATEGIA DE RECOLECCION DE ENERGIA ideada por el físico Steven Frautschi ilustra lo difícil que será sobrevivir en el futuro lejano, dentro de unos 10^{100} años. En muchas situaciones cosmológicas, los recursos se multiplican a medida que el universo —y cualquier esfera de referencia arbitraria en él (*esfera azul*)— se expande y se vuelve observable una fracción suya cada vez mayor (*esfera roja*). Una civilización podría utilizar un agujero negro para convertir materia —aprehendida de sus dominios (*esfera verde*)— en energía. Pero conforme crecen sus dominios, aumenta el coste de incautar nuevo territorio; la conquista apenas si puede mantener el ritmo de dilución de la materia. De hecho, la materia se enrarecerá hasta el punto de que la civilización no será capaz de construir sin peligro un agujero negro suficientemente grande como para repescarla.

El Sol acabará por agotar su reserva de hidrógeno. La vida tal como la conocemos en nuestro planeta terminará. Pero la raza humana se amolda. Nuestra descendencia buscará nuevos hogares, propagándose por todos los rincones del universo de la misma suerte que los organismos han colonizado todos los nichos posibles en la Tierra. La muerte y el mal se cobrarán su tributo; quizá persistan dolor y angustia, aunque nuestra progenie sabrá sobrellevarlos.

O tal vez no. Los científicos andan lejos de entender las bases físicas de la vida y el devenir del universo; pese a ello, pueden aventurar algunas hipótesis razonables sobre el destino de los seres vivos. Las observaciones cosmológicas actuales indican que el universo continuará expandiéndose por siempre, en vez de crecer hasta un tamaño máximo para luego contraerse, según se pensaba antes.

Por tanto, no estamos condenados a perecer en una violenta "gran implosión" en la que se borrara cualquier vestigio de nuestra civilización actual o futura. A primera vista, la expansión perpetua es motivo de optimismo. ¿Qué podría impedir que una civilización avanzada explotara recursos sin término para sobrevivir indefinidamente?

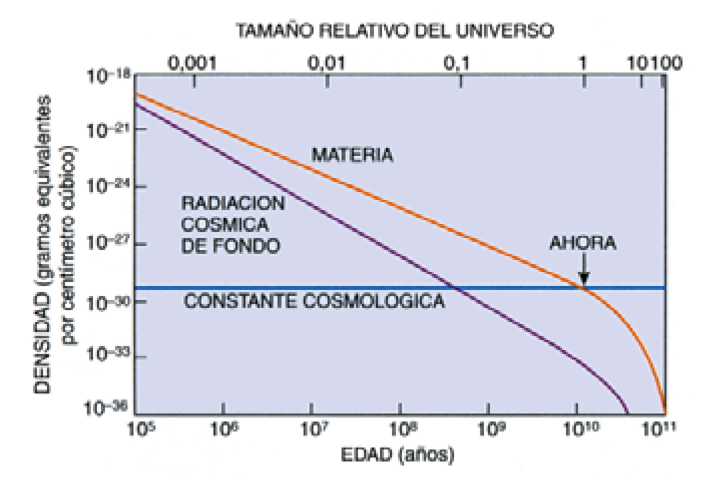
Ahora bien, la vida medra con energía e información. Y, de acuerdo con propuestas muy generales, sólo pueden acumularse cantidades finitas de energía y de información incluso durante un tiempo infinito. Para que la vida persistiera, tendría que desenvolverse con menguantes recursos y un conocimiento limitado. Hemos llegado a la conclusión de que ninguna forma significativa de conciencia puede existir para siempre bajo estas condiciones.

Los desiertos de la vasta eternidad

Durante el siglo pasado, la escatología científica —doctrina sobre el sino del mundo— ha oscilado entre el optimismo y el pesimismo. No mucho después de la confiada predicción de Darwin, los científicos de la época victoriana comenzaron a preocuparse por la "muerte térmica", en la que el cosmos entero llegaría a una temperatura constante por doquier, volviéndose incapaz de cambiar.

El descubrimiento de la expansión del universo en los años veinte aquietó esa ansiedad, porque la expansión impide que el universo alcance tal equilibrio. Pero pocos cosmólogos derivaron otras consecuencias para la vida en un universo en expansión indefinida, hasta que en 1979 apareció el artículo hoy clásico del físico Freeman Dyson, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, a su vez motivado por un trabajo anterior de Jamal Islam, actualmente en la Universidad de Chittagong, en Bangladesh. Desde el artículo de Dyson, los físicos y los astrónomos han vuelto una y otra vez sobre el tema. Hace un año, espoleados por recientes observa-

Aparece el electromagnetismo
Se crean los núcleos atómicos
10^{-11} segundos transcurridos desde la gran explosión
10^{-5} años



3. LA DILUCION del cosmos por la expansión del espacio afecta de manera diferente a las diversas formas de energía. La materia ordinaria (*naranja*) se enrarece en proporción directa al volumen, mientras que la radiación cósmica de fondo (*violeta*) escasea con más rapidez aún a medida que la luz se estira hasta las microondas y más allá todavía. La densidad de energía representada por una constante cosmológica (*azul*) no cambia, según las teorías actuales.

ciones que apuntan un futuro a largo plazo del universo radicalmente diferente del que hasta ahora se había imaginado, decidimos considerar el asunto de nuevo.

Durante los últimos 12.000 millones de años, más o menos, el universo ha atravesado varias etapas. En los tiempos más antiguos era increíblemente caliente y denso. Gradualmente, se expandió y se enfrió. Durante cientos de miles de años, la radiación imperaba; se cree que el célebre fondo cósmico de microondas es un vestigio de esa era. Luego comenzó a dominar la materia. Se erigieron estructuras astronómicas cada vez mayores. Ahora, si las recientes observaciones cosmológicas son correctas, la expansión del universo empieza a acelerarse, una señal de que un extraño tipo nuevo de energía, quizá proveniente del espacio mismo, está imponiéndose.

La vida tal como la conocemos depende de las estrellas. Pero las estrellas mueren sin remedio; su tasa de nacimiento ha disminuido aparatosamente tras un apogeo inicial hace unos 10.000 millones de años. Dentro de unos 100 billones de años, la última estrella formada según las pautas conocidas languidecerá, y comenzará una nueva era. Ciertos procesos, demasiado lentos hoy para reparar en ellos, adquirirán protagonismo: la dispersión de los sistemas planetarios por encuentros cercanos entre estrellas, el posible decaimiento de la materia ordinaria y exótica, la lenta evaporación de los agujeros negros.

Suponiendo que la vida inteligente pueda adaptarse a las cambiantes circunstancias, ¿a qué límites fundamentales se enfrenta? En un universo eterno, potencialmente de volumen infinito, cabría esperar que una civilización avanzada pudiera hacer acopio de una cantidad infinita de materia, energía e información.

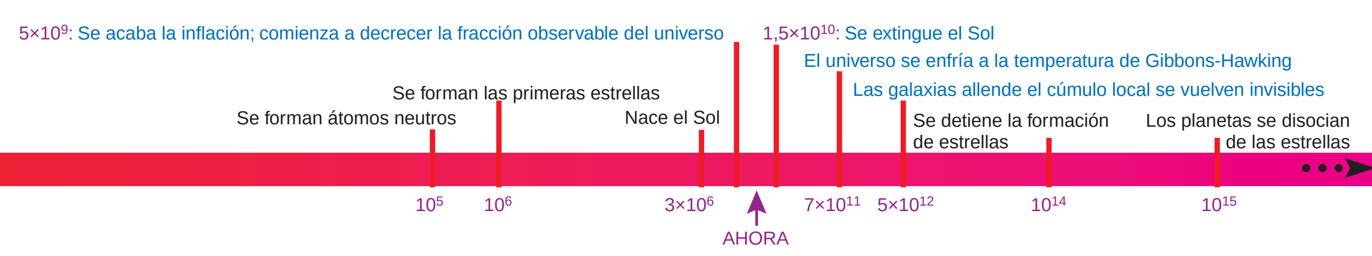
Sorprendentemente, eso no es cierto. Incluso tras una eternidad de duro y bien planificado quehacer, los seres vivos sólo llegarían a acumular un número finito de partículas, una cantidad finita de energía y un número finito de bits de información. Para mayor frustración, el número de partículas, ergios y bits disponibles puede crecer sin límite. El problema no es necesariamente la falta de recursos, sino la dificultad de reunirlos.

La culpa la tiene lo mismo que nos permite considerar la subsistencia eterna: la expansión del universo. A medida que el universo crece en tamaño, mengua la densidad media de las fuentes ordinarias de energía. Si se duplica el radio del universo se divide por ocho la densidad de átomos. Para las ondas luminosas, la disminución es aún más aguda; en cada duplicación del radio su densidad de energía decrece por un factor 16 porque la expansión las estira y por ello agota su energía.

Como resultado de esta dilución, el recolectar recursos consume cada vez más tiempo. Los seres inteligentes tienen dos estrategias bien claras: o dejar que el material les llegue o tratar de recolectarlo ellos. En el primer caso, la mejor decisión a largo plazo es dejar que la gravedad actúe. De todas las fuerzas de la naturaleza, sólo la gravedad y el electromagnetismo pueden atraer las cosas desde distancias arbitrariamente grandes. Pero el electromagnetismo sufre apantallamiento: las partículas cargadas con signo opuesto se contrarrestan entre sí. Un objeto típico del universo es neutro y, por tanto, inmune a las fuerzas eléctricas y magnéticas de largo alcance. La gravedad, por contra, no puede apantallarse, porque las partículas de materia y la radiación sólo se atraen gravitatoriamente; no se repelen.

Rendirse al vacío

Pero hasta la gravedad debe rivalizar con la expansión del universo, que separa los objetos y debilita con ello su atracción mutua. En todas las circunstancias, salvo en una, la gravedad acaba por resultar incapaz de acumular grandes cantidades de materia. De hecho, puede que nuestro universo haya alcanzado ya esta condición; quizá los cúmulos de galaxias sean los mayores objetos que la gravedad consiga mantener juntos. La única excepción acaece si el universo se encuentra justo en equilibrio entre la expansión y la contracción, en cuyo caso la gravedad continúa indefinidamente acumulando cantidades de materia cada vez mayores. Pero se cree ahora que esta situación contradice las observaciones. Y no está exenta de dificultades: tras unos 10^{33} años, la materia accesible se encontrará tan concentrada, que la mayor parte se colapsará en agujeros negros, llevándose cualquier forma de vida. Encontrarse dentro de un agujero negro no es una condición agradable. En la Tierra, todos los caminos llevan a Roma, pero dentro de un agujero negro todos los caminos llevan en un plazo finito de tiempo al centro del agujero, donde la muerte y la desmembración sobrevienen indefectiblemente.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero, 2000 41

LAWRENCE M. KRAUSS y GLENN D. STARKMAN enseñan en el departamento de física de la Universidad Case Western Reserve de Cleveland, dirigido por aquél, que fue también uno de los primeros cosmólogos en proponer que el universo está dominado por una constante cosmológica, una opinión que hoy día es ampliamente compartida. Starkman goza de reconocida fama por su trabajo sobre la topología del universo.

Por desgracia, ninguna estrategia de búsqueda activa de recursos sale mejor parada que la pasiva. La expansión del universo se lleva energía cinética, de manera que los recolectores tendrían que largar por la borda su botín para mantener su velocidad. Incluso en la situación más optimista (en la que la energía viaja camino del recolector a la velocidad de la luz y se recoge sin pérdidas) una civilización sólo podría hacer acopio de una cantidad ilimitada de energía dentro o cerca de un agujero negro. Esta última posibilidad fue estudiada por Steven Frautschi, del Instituto de Tecnología de California, en 1982. Concluyó que la energía disponible de los agujeros disminuiría más velozmente que lo que cuesta recogerla. Hace poco volvimos a examinar esta posibilidad y encontramos que los apuros serían aún mayores de lo que Frautschi había pensado. El tamaño del agujero negro necesario para recoger energía indefinidamente supera el tamaño del universo visible.

La dilución cósmica de la energía es un verdadero aprieto si el universo se expande a una celeridad cada vez mayor. Todos los objetos remotos que aún percibimos acabarán por alejarse de nosotros más rápido que la velocidad de la luz y, al ocurrir eso, desaparecerán de nuestra vista. Los recursos totales a nuestra disposición están por tanto limitados a lo que podamos ver hoy, como máximo.

No todas las formas de energía están sujetas en igual medida a la dilución. El universo podría, por ejemplo, estar repleto de una red de cuerdas cósmicas (concentraciones de energía infinitamente largas y delgadas que podrían haber aparecido al tiempo que el universo primigenio se enfriaba desigualmente). La energía por unidad de longitud de una cuerda cósmica permanece constante a pesar de la expansión del universo. Los seres inteligentes podrían intentar cortar una cuerda, congregarse en torno a los extremos seccionados y comenzar a consumir la energía. Si la red de cuerdas fuera infinita, podrían albergar la esperanza de satisfacer su apetito para siempre. El problema de esta estrategia es que lo que cualquier forma de vida pueda hacer, lo pueden hacer también los procesos naturales. Si una civilización llegara a ingeniárselas para cortar cuerdas cósmicas, la red de cuerdas se desmembraría; podrían, por ejemplo, aparecer espontáneamente agujeros negros en las cuerdas que los devoraran. Por tanto, los seres sólo podrían usufructuar una cantidad finita de cuerda hasta encontrar otro extremo cortado. La entera red de cuerdas acabaría por desaparecer, dejando desamparada a la civilización.

El peor de los universos posibles

De entre todas las situaciones de un universo en eterna expansión, la más desoladora es la que está dominada por la llamada constante cosmológica. No sólo se haría irremediable que en ese universo la vida se acabe, sino que, además, la calidad de vida se deterioraría rápidamente. De corroborarse las recientes observaciones que indican que la expansión se está acelerando, el futuro que nos espera se presenta lúgubre.

La expansión cósmica se lleva los objetos, apartándolos entre sí a no ser que queden sujetos por la gravedad u otra fuerza. En nuestro caso, la Vía Láctea forma parte de un cúmulo de galaxias mayor. Este cúmulo, cuya sección es de unos 10 millones de años-luz, permanece como una entidad cohesionada, mientras que las galaxias exteriores al mismo son barridas a medida que se expande el espacio intergaláctico. La velocidad relativa de estas galaxias remotas es proporcional a su distancia. Más allá de una cierta distancia llamada horizonte, la velocidad excede a la de la luz (lo cual no contradice la teoría de la relatividad, porque es la expansión del espacio mismo la que imparte esa velocidad). Más lejos no se puede ver nada.

Si el universo tiene una constante cosmológica de valor positivo, como apuntan las observaciones, la expansión se está acelerando: las galaxias están empezando a separarse cada vez más rápido. Su velocidad sigue siendo proporcional a su distancia, pero la constante de proporcionalidad permanece inalterada en vez de disminuir con el tiempo, como ocurre si el universo se decelera. Consecuentemente, las galaxias que ahora se encuentran más allá de nuestro horizonte quedarán para siempre fuera de nuestra vista. Incluso las galaxias que ahora vemos (excepto las de nuestro cúmulo local) acabarán por adquirir la velocidad de la luz y desaparecer de nuestra vista. La aceleración, que guarda un parecido con la inflación del universo en sus etapas más tempranas, comenzó cuando el cosmos tenía aproximadamente la mitad de la edad actual.

La desaparición de las galaxias lejanas será gradual. Su luz se estirará hasta que se vuelva indetectable. Conforme pase el tiempo, disminuirá la cantidad de materia que podamos ver, y el número de mundos que nuestras naves espaciales puedan alcanzar irá menguando. Dentro de dos billones de años, mucho antes de que muera la última de las estrellas del universo, ya no serán observables ni accesibles ninguno de los objetos que no pertenezcan a nuestro propio cúmulo de galaxias. No habrá más mundos que conquistar, literalmente. Estaremos realmente solos en el universo.

—L.M.K. y G.D.S.

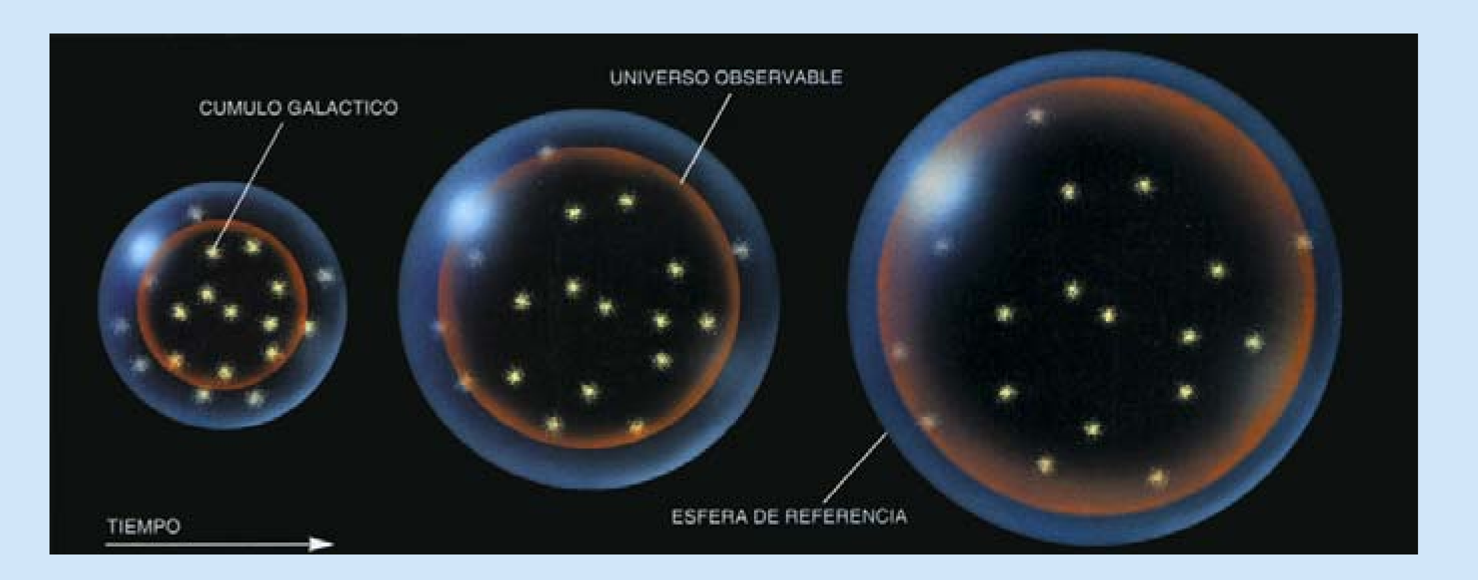
¿Qué hay de la extracción del vacío cuántico? Después de todo, la aceleración cósmica puede estar accionada por la llamada constante cosmológica, una forma de energía que no se diluye a medida que el universo se expande. De ser así, el espacio vacío estaría lleno de un extraño tipo de radiación, llamada radiación de Gibbons-Hawking o de de Sitter. Lamentablemente, es imposible extraer energía de esta radiación para realizar trabajo útil. Si el vacío proporcionara energía, caería a un estado de energía más bajo, pero el vacío ya es el estado de energía más bajo que existe.

Los agujeros negros consumen las galaxias

Se acaba el combustible galáctico, a la actual tasa de consumo

10^{30}

10^{37} años transcurridos desde la gran explosión





4. EL UNIVERSO EN EXPANSION tiene un aspecto completamente diferente si el crecimiento se decelera (*secuencia superior*) o si se acelera (*secuencia inferior*). En ambos casos, el universo es infinito, pero cualquier porción del espacio —demarcada por una esfera de referencia que representa la distancia a ciertas galaxias— se hace mayor (*esfera azul*). Sólo podemos observar un volumen limitado, que crece invariablemente a medida que les da tiempo de propagarse a las señales luminosas (*esfera roja*). Si la expansión se decelera, podemos observar una fracción del cosmos cada vez mayor. Más y más galaxias llenarán el cielo. Pero si la expansión está acelerándose, veremos una fracción del cosmos cada vez menor. El espacio parece vaciarse.

Con independencia de lo inteligentes que seamos y de lo cooperativo que se muestre el universo, algún día nos tendremos que enfrentar a la limitación de los recursos disponibles. Incluso así, ¿hay alguna manera de resistir indefinidamente?

La estrategia obvia consiste en no crearse necesidades, un ardid que Dyson examinó cuantitativamente. Para reducir el consumo de energía y mantenerlo restringido a pesar de los trajines, tendríamos que acabar por reducir la temperatura corporal. Se podría especular sobre humanos producto de la ingeniería genética que se mantuvieran a temperaturas algo por debajo de los 37 grados C. Pero la temperatura corporal del cuerpo humano no puede reducirse arbitrariamente; la temperatura de congelación de la sangre es un límite firmemente establecido. Cabría, en opción alternativa, despojarnos por entero de nuestros cuerpos.

Por futurística que pueda parecer, la idea de desprendernos de nuestros cuerpos no presenta dificultades fundamentales. Sólo supone que la consciencia no está ligada a un conjunto particular de moléculas orgánicas, sino que puede tomar cuerpo en una multitud de formas diferentes, desde cyborgs hasta nubes interestelares conscientes. Muchos filósofos y gnoseólogos modernos consideran que el pensamiento consciente es un proceso que un ordenador podría llevar a cabo. No es necesa-

El efecto túnel cuántico licua la materia

10^{65}

rio que nos preocupemos aquí de los detalles (lo cual resulta apropiado, pues no estamos en disposición de hacerlo). Todavía disponemos de muchos miles de millones de años para diseñar nuevas encarnaciones físicas a las que transferir algún día nuestros entes conscientes. Estos nuevos "cuerpos" funcionarán a temperaturas más frías y a tasas metabólicas más bajas, esto es, a tasas más bajas de consumo energético.

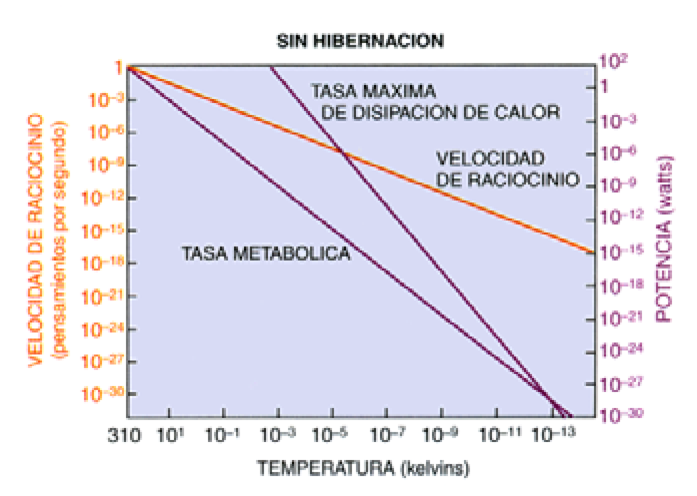
Dyson demostró que, si los organismos pudieran frenar su metabolismo a medida que el universo se enfría, podrían componérselas para consumir una cantidad total de energía finita durante toda la eternidad. Aunque las temperaturas más bajas también frenarían la consciencia (el número de pensamientos por segundo), la tasa seguiría siendo suficientemente grande para que el número total de pensamientos fuera, en principio, ilimitado. En breve, los seres inteligentes podrían sobrevivir para siempre, no sólo en tiempo absoluto sino también en tiempo subjetivo. Siempre que se les garantizara a los organismos un número infinito de pensamientos, no les importaría llevar una vida con un ritmo lánguido. Cuando se dispone de miles de millones de años por delante, ¿a qué vienen las prisas?

A primera vista, diríase que eso se consigue de balde. Pero las matemáticas del infinito retan tal intuición. Para que un organismo mantuviera el mismo grado de complejidad, argüía Dyson, su velocidad de procesamiento de información debe ser directamente proporcional a la temperatura corporal, mientras que la tasa de consumo de energía es proporcional al cuadrado de la temperatura (el factor adicional de la temperatura resulta de la termodinámica básica). Por tanto, los requerimientos de energía se reducen más rápidamente que la agudeza cognitiva. A 37 grados C, el cuerpo humano gasta aproximadamente 100 watts. A –118 grados C, un organismo de complejidad equivalente podría pensar a la mitad de velocidad, pero gastaría una cuarta parte de la potencia. La transacción es aceptable porque los procesos físicos del ambiente aminoran su ritmo en proporción equivalente.

Morir, dormir

Lamentablemente, hay truco. La mayor parte de la energía se disipa en forma de calor, que debe escapar (usualmente por radiación) para que el objeto no se caliente. La piel humana, por ejemplo, brilla en el infrarrojo. A temperaturas muy bajas, el radiador más eficiente sería un gas diluido de electrones. Pero incluso la eficiencia de este radiador óptimo decrece con el cubo de la temperatura, más velozmente que la disminución de la tasa metabólica. Llegaría un momento en que los organismos no podrían reducir más su temperatura. Se verían forzados irremediablemente a reducir su complejidad, esto es, a volverse más necios. En poco tiempo, no podrían ser siquiera considerados inteligentes.

Para los tímidos, esto podría parecer el final. Mas para compensar la ineficiencia de los radiadores, Dyson concibió una audaz estrategia de hibernación. Los organismos sólo pasarían despiertos una pequeña fracción de su tiempo. Mientras durmieran, sus ritmos metabólicos decaerían, pero —y esto es crucial— seguirían disipando calor. De esta manera, conseguirían una temperatura corporal media todavía más baja. Entregados a la latencia una fracción cada vez mayor de su tiempo, podrían consumir una cantidad finita de energía y, sin embargo, existir para siempre y tener un número infinito de pensamientos. Dyson concluyó que efectivamente la vida eterna era posible.



5. ¿VIDA ETERNA CON ENERGIA FINITA? Si una nueva forma de vida pudiera reducir su temperatura corporal por debajo del valor de los 37 grados C, consumiría menos energía, aunque a costa de un raciocinio más lánguido (*gráfico de la izquierda*). Como el metabolismo decaería más velozmente que el raciocinio, la forma de vida podría arreglárselas para concebir un número infinito de pensamientos con recursos limitados. Pero con la reserva de que su capacidad para disipar el calor residual también disminuiría, impidiendo que se pudiera enfriar por debajo de los 10^{-13} kel-

Desde aquel artículo original de 1979, han surgido varias dificultades para este plan. Para empezar, Dyson concedió que la temperatura media del espacio profundo (actualmente 2,7 kelvins, como impone el fondo cósmico de radiación de microondas) disminuiría sin cesar a medida que el universo se expande, de manera que los organismos podrían continuar reduciendo su temperatura indefinidamente. Pero si el universo posee una constante cosmológica, la temperatura tiene un mínimo absoluto fijado por la radiación de Gibbons-Hawking. Para las estimaciones actuales del valor de la constante cosmológica, esta radiación presenta una temperatura efectiva de unos 10^{-29} kelvin. Como señalaron independientemente los cosmólogos J. Richard Gott II, John Barrow, Frank Tipler y nosotros mismos, una vez que los organismos se hubieran enfriado hasta este nivel, no podrían continuar reduciendo su temperatura para consumir menos energía.

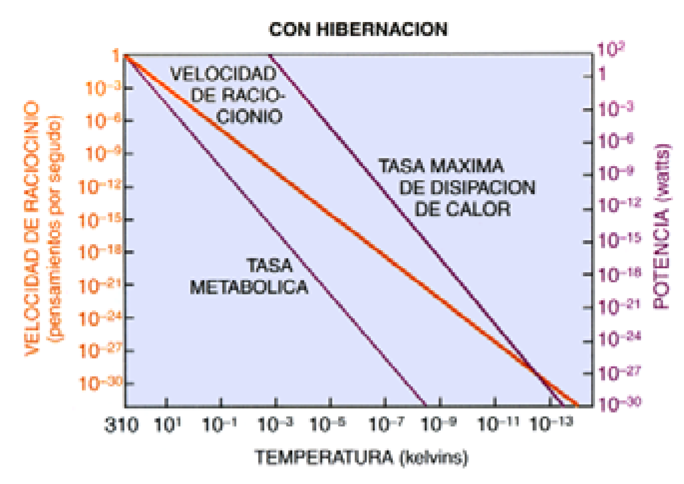
Una segunda dificultad: se requieren relojes despertadores para despabilar a los organismos periódicamente. Estos relojes tendrían que operar con precisión durante lapsos cada vez más largos con energías cada vez menores. La mecánica cuántica nos dicta que tal cosa es imposible. Considérese, por ejemplo, un despertador que consista en dos pequeñas bolas que se separen lo suficiente, se apunte luego la una hacia la otra y se suelten. Cuando chocan, suena un timbre. Para alargar el

Los electrones y los positrones se combinan formando una nueva clase de materia

Se evaporan los agujeros negros galácticos

10^{85} años desde la gran explosión

10^{98}



vin. La hibernación (*gráfico de la derecha*) podría eliminar el problema de la expulsión de calor. A medida que la forma de vida se enfriase, pasaría dormida una fracción de tiempo cada vez mayor, reduciendo aún más su tasa metabólica promedio y su velocidad de raciocinio. De esta manera, el consumo de potencia se podría mantener siempre por debajo de la tasa máxima de disipación de calor, a la vez que permitiría un número infinito de pensamientos. Pero este ardid se vería desbaratado por otros problemas, como los límites cuánticos.

tiempo entre los timbrazos, los organismos soltarían las bolas a velocidades cada vez menores. El reloj acabará por enfrentarse a las limitaciones del principio de indeterminación de Heisenberg, que impide que la velocidad y la posición de las bolas se especifique a la vez con una precisión arbitraria. Si la una o la otra son suficientemente imprecisas, el despertador no funcionará, y la hibernación se convertirá en el descanso eterno.

Podrían imaginarse otros despertadores que permanecieran para siempre por encima de los límites cuánticos y quedaran incluso integrados en el mismo organismo. No obstante, a nadie se le ha ocurrido todavía ningún mecanismo específico fiable que pueda despertar a un organismo consumiendo además una cantidad finita de energía.

La tercera duda, y la más general, sobre la viabilidad de la vida inteligente a largo plazo tiene que ver con las limitaciones fundamentales de la computación. Los informáticos pensaban tiempo ha que era imposible calcular sin gastar una cantidad mínima de energía por operación, una cantidad que es directamente proporcional a la temperatura del ordenador. Luego, a principios de los ochenta, los investigadores se dieron cuenta de que ciertos procesos físicos, así los efectos cuánticos o el movimiento browniano de una partícula en un fluido, podrían servir de base para un ordenador sin pérdidas. Tales ordenadores podrían funcionar con una cantidad de energía arbitrariamente pequeña. Para emplear menos, irían más lentos (un compromiso que los organismos eternos pueden llegar a alcanzar). Sólo hay dos condiciones. La primera, los computadores deben permanecer en equilibrio térmico con su entorno. La segunda, nunca deben borrar información. Si lo hicieran, la computación se volvería irreversible. Según las leyes de la termodinámica un proceso irreversible debe disipar energía.

Desafortunadamente, estas condiciones son imposibles de cumplir en un universo en expansión. Conforme la energía cósmica se diluye y se estira la longitud de onda de la luz, los organismos se vuelven incapaces de emitir o absorber la radiación que necesitarían para establecer un equilibrio térmico con sus alrededores. Y con una cantidad finita de materia a su disposición, y por tanto una memoria finita, finalmente tendrían que olvidar un pensamiento viejo para poder concebir uno nuevo.

¿Qué clase de existencia perpetua podrían tener esos organismos, siquiera en principio? Podrían reunir sólo un número finito de partículas y una cantidad finita de información. Esas partículas y bits sólo podrían configurarse en un número finito de maneras. Como los pensamientos son la reorganización de la información, una información finita implica un número finito de pensamientos. Todo lo que acabarían haciendo los organismos sería rememorar el pasado, meditando los mismos pensamientos una y otra vez. La eternidad se convertiría en una prisión, en vez de en un horizonte cada vez más amplio para la creatividad y el descubrimiento. Puede que fuera el nirvana; pero, ¿sería realmente vida?

Dyson no se rinde. En su correspondencia con nosotros, ha sugerido que la vida puede soslayar los límites cuánticos de la energía y la información, por ejemplo creciendo en tamaño o empleando diferentes tipos de memoria. En sus propias palabras, la cuestión reside en si la vida es "analógica" o "digital", esto es, si es la física del continuo o la física cuántica la que impone sus límites. Nosotros creemos que a largo plazo la vida es digital.

¿Queda alguna otra esperanza para la vida eterna? La mecánica cuántica, que, en nuestra opinión, impone un límite ineludible a la vida, puede acudir en su auxilio de otra guisa. Por ejemplo, si la mecánica cuántica de la gravedad permite la existencia de agujeros de gusano estables, las formas de vida podrían soslayar las barreras levantadas por la velocidad de la luz, visitar partes del universo que de otra manera serían inaccesibles y recoger cantidades infinitas de energía e información. O quizá pudieran construir universos "bebé" y enviarse a sí mismos, o al menos un conjunto de instrucciones para reconstituirse a sí mismos, hasta el universo bebé. De esta manera, la vida podría perpetuarse.

En cualquier caso, los límites definitivos de la vida sólo se volverán significativos a escalas de tiempo realmente cósmicas. Aun así, para algunos puede resultar perturbador que la vida, en su encarnación física, deba tener un final. Mas para nosotros resulta notable que, incluso con nuestro limitado conocimiento, podamos extraer conclusiones hasta de asuntos tan subidos. Quizás el enterarnos de nuestro fascinante universo y de nuestro destino en él sea un don mayor que la capacidad de morar en él para siempre.

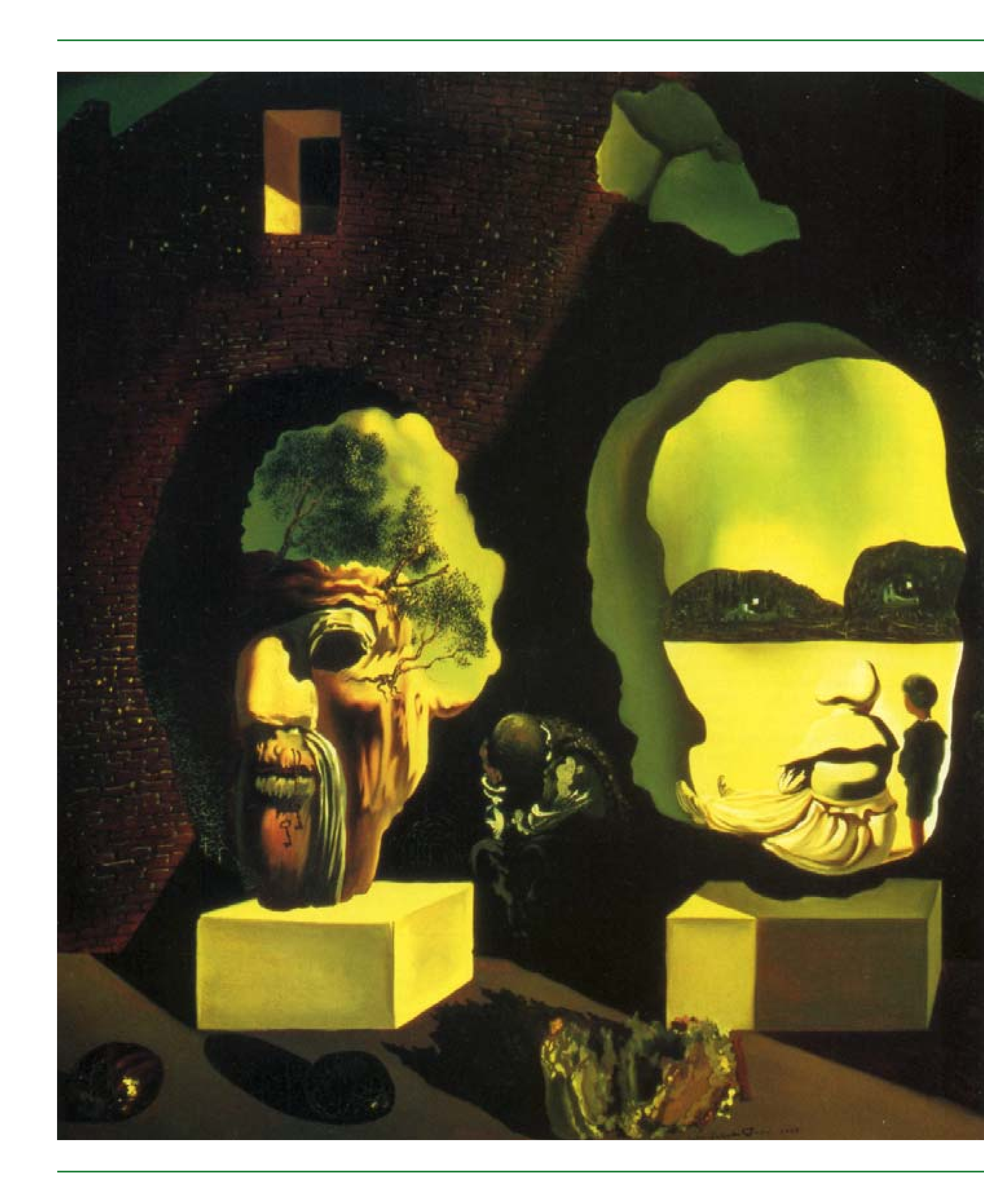
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

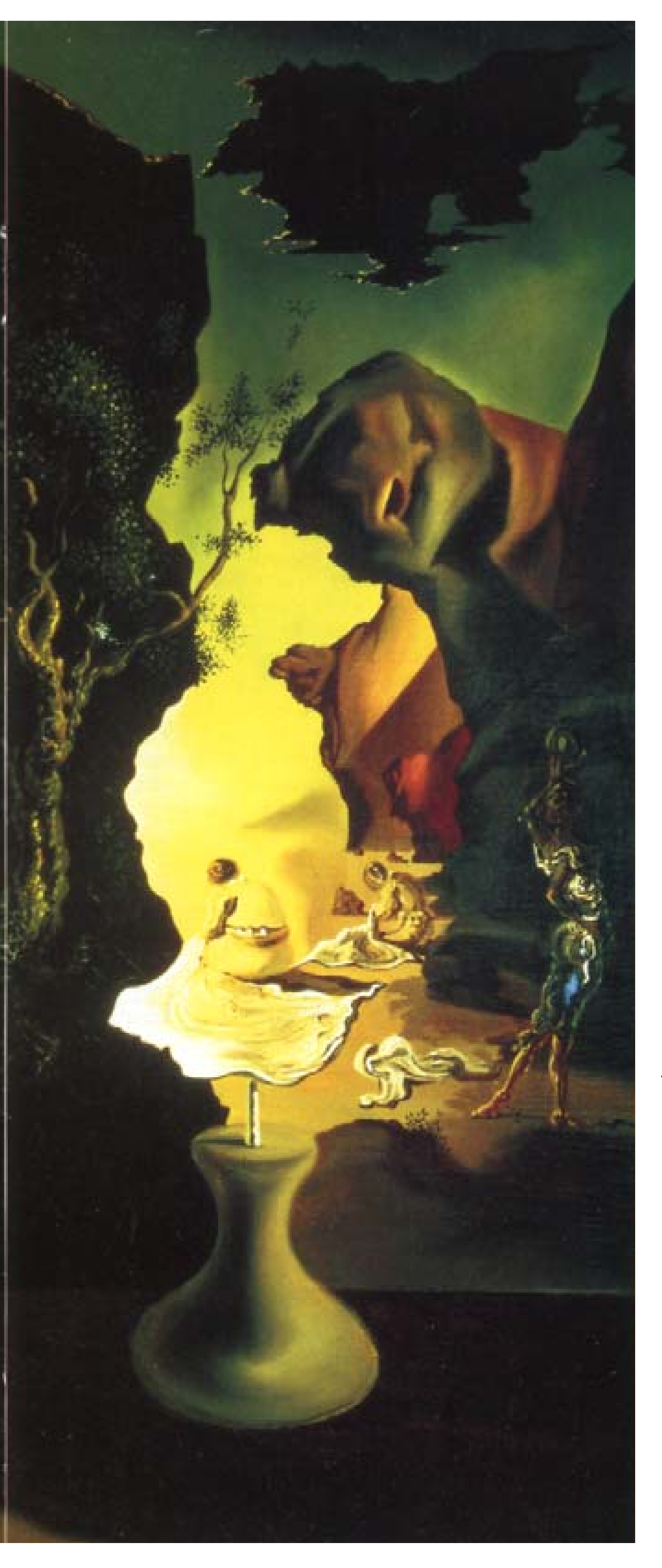
THE LAST THREE MINUTES: CONJECTURES ABOUT THE ULTIMATE FATE OF THE UNIVERSE. Paul C. W. Davies. HarperCollins, 1997.

THE FIVE AGES OF THE UNIVERSE: INSIDE THE PHYSICS OF ETERNITY. Fred Adams y Greg Laughlin. Free Press, 1999.

QUINTESSENCE: THE MISTERY OF THE MISSING MASS. Lawrence M. Krauss. Basic Books, 1999.

LIFE, THE UNIVERSE AND NOTHING: LIFE AND DEATH IN AN EVER-EXPANDING UNIVERSE. Lawrence M. Krauss y Glenn D. Starkman, en *Astrophysical Journal* (en prensa). También disponible en Internet en xxx.lanl.gov/abs/astro-ph/9902189.





La visión, ventana a la consciencia

¿Cómo reparamos en lo que vemos? La exploración de la mente humana se centra en la percepción visual

Nikos K. Logothetis

¿Qué vemos en la imagen central del cuadro de Salvador Dalí aquí reproducido? Lo primero que percibe la mayoría de la gente es la cara de un hombre con antifaz, los ojos vueltos al cielo y los labios fruncidos bajo un poblado mostacho. Pero, al mirarla otra vez, la imagen se fragmenta en otras más complejas. La nariz y el bigote blanco del hombre se convierten en la cofia y el mantón de una mujer sentada. Los reflejos en los ojos pasan a ser luces en las ventanas —o destellos en los tejados— de dos casitas cobijadas en oscuras laderas. Las sombras en la mejilla dibujan un niño en pantalón corto, de pie junto a la mujer sentada; se aprecia ahora claramente que ambos miran por encima de un lago a las dos casitas a través de la abertura de un muro de ladrillos, que antes nos parecía el contorno de ese rostro humano.

En 1940, en su cuadro *La Vejez, la Adolescencia, la Infancia (Las Tres Edades)*, donde se representan tres caras humanas, Dalí jugaba con la capacidad de la mente del espectador para interpretar diferentes imágenes a partir de un mismo conjunto de pinceladas. Más de 50 años después, los investigadores utilizamos similares estímulos visuales para identificar la actividad cerebral que subyace a la consciencia. Por ejemplo, queremos averiguar lo que ocurre en el cerebro cuando el observador percibe que los tres rostros del cuadro de Dalí en realidad no son rostros.

La consciencia es un concepto difícil de definir, y no digamos de estudiar. En los últimos años la neurología ha hecho importantes progresos para comprender los complejos patrones de actividad que se producen en las neuronas del cerebro. Con todo, la mayoría de las personas e incluso numerosos científi-

1. LOS ESTIMULOS AMBIGUOS, como en el cuadro de Salvador Dalí que lleva por título *La Vejez, la Adolescencia, la Infancia (Las Tres Edades)*, son muy útiles para estudiar el fenómeno de la consciencia por medio de la percepción visual.

NIKOS K. LOGOTHETIS dirige la división de fisiología de procesos cognitivos del Instituto Max Planck de Cibernética Biológica en Tubinga. Doctorado por la Universidad Ludwig-Maximillians de Munich, completó su formación en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Antes de volver a Alemania pasó siete años enseñando en Houston.

cos todavía cuestionan la explicación de la actividad mental, y en particular la consciencia, por descargas electroquímicas de las neuronas.

Como sostienen Francis Crick, del Instituto Salk de Estudios Biológicos en San Diego, y Christof Koch, del Instituto de Tecnología de California, en el problema de la consciencia se pueden considerar distintas cuestiones, algunas de ellas susceptibles de encuesta científica. Por ejemplo, en vez de inquietarnos por determinar qué es la consciencia, nos podemos preguntar: ¿en qué se distinguen los procesos nerviosos que corresponden a una determinada experiencia consciente de los demás procesos?

Es aquí donde aparecen los estímulos ambiguos. La percepción ambigua no es un comportamiento caprichoso propio de la organización del sistema visual. Antes bien, nos enseña algo sobre la estructura del cerebro entero y la manera de hacernos conscientes de la información sensorial. A veces una secuencia de palabras, aparentemente sin sentido en un idioma, adquiere repentinamente un significado por su proximidad fonética a una frase en nuestra propia lengua. Y cabe entonces preguntarse por los cambios que sufre la actividad nerviosa cuando se toma consciencia de ese significado.

En nuestro trabajo sobre estímulos visuales ambiguos, utilizamos imágenes que además de dar origen a dos percepciones distintas también provocan una continua alternancia entre ambas. Es muy conocido el ejemplo del cubo de Necker. Esta figura se percibe como un cubo tridimensional, pero con perspectivas que se alternan cada pocos segundos. Obviamente, tal alternancia debe obedecer a algo que ocurre en el cerebro.

Los escépticos podrían aducir que a veces percibimos un estímulo sin ser plenamente conscientes del mismo; por ejemplo, cuando detenemos "automáticamente" el coche ante un semáforo en rojo. Pero nosotros investigamos estímulos y situaciones concebidos para provocar el estado de consciencia.

Sabemos que los seres humanos son conscientes de tales estímulos porque ellos pueden contarnos sus experiencias. Pero muchas veces no es posible estudiar la actividad de neuronas individuales en humanos despiertos, y entonces las pruebas se realizan con primates amaestrados para señalar lo que perciben moviendo palancas o mirando en una dirección determinada. Los cerebros de los primates tienen una organización similar a la de los humanos y responden de modo muy parecido a esos estímulos. Creemos, pues, que estos animales son conscientes de un modo bastante análogo al de los seres humanos.

Estamos investigando las ambigüedades a que da lugar la presentación simultánea de dos patrones visuales diferentes, uno a cada ojo, fenómeno que se denomina rivalidad binocular. El cerebro de las personas sometidas a esta situación toma primero consciencia de una percepción y después de la otra, alternando lentamente entre ambas.

Para crear este efecto en el laboratorio utilizamos estereoscopios. Los primates adiestrados y sometidos a esta estimulación visual señalan que también a ellos les varía su percepción cada pocos segundos. Nuestros experimentos nos han permitido seguir el recorrido de la actividad nerviosa que corresponde a estas respuestas alternantes.

2. EL CUBO DE NECKER puede contemplarse de dos diferentes maneras, según se vea la "x" en la arista superior de la cara frontal del cubo o en el de la cara posterior. A veces el cubo parece superpuesto a los círculos, y otras veces los círculos semejan agujeros por detrás de los cuales flota el cubo.

Tras decenios de trabajo, la investigación de la actividad nerviosa en los animales ha llegado a la conclusión de que la información visual emitida por los ojos sigue una trayectoria que atraviesa las sucesivas etapas de un sistema de procesamiento de datos. Diferentes módulos analizan los diversos atributos del campo visual. Por lo general, a medida que la información avanza por esta trayectoria visual, el tipo de procesamiento adquiere mayor especialización.

En el inicio de la trayectoria, las señales procedentes de la retina, en la parte posterior del ojo, se canalizan en forma de impulsos eléctricos hacia un par de pequeñas estructuras embutidas en el cerebro, llamados núcleos geniculados laterales (NGL). Una neurona de los NGL puede ser activada por estimulación visual desde un ojo o desde el otro, pero no desde ambos a la vez. Esas células nerviosas responden así a los cambios de luminosidad o de color que aparecen en una región determinada dentro de la zona visual llamada campo receptivo, que varía de una neurona a otra.

Desde los NGL, la información visual se traslada al córtex visual primario situado en la región occipital, que abreviadamente se denomina V1. Las neuronas del V1 se comportan de diferente modo que las de los NGL. Habitualmente pueden ser activadas desde uno u otro ojo, pero también son sensibles a atributos específicos; verbigracia, la dirección de movimiento de un estímulo situado dentro de su campo receptivo. La información visual se transmite desde V1 a más de dos docenas de otras regiones corticales distintas.

A partir de V1 puede seguirse el recorrido de ciertas informaciones que se van desplazando a través de las zonas denominadas V2 y V4 hasta alojarse en las regiones que forman el córtex temporal inferior (CTI), que como todas las demás estructuras son bilaterales, es decir, se hallan en ambos hemisferios. Numerosas investigaciones, incluidos los estudios neurológicos sobre personas aquejadas de lesiones cerebrales,

revelan que el CTI es importante para la percepción de las formas y el reconocimiento de objetos. Se sabe que las neuronas de V4 responden selectivamente a aspectos de los estímulos visuales que son críticos para discernir las formas. En el CTI hay neuronas que se comportan como células de V4, pero otras en cambio sólo responden cuando se colocan objetos enteros, tales como rostros, en sus amplios campos receptivos.

Otras señales procedentes de V1 atraviesan las regiones V2, V3 y una zona llamada TM/V5 antes de llegar finalmente al lóbulo parietal del cerebro. La mayoría de las neuronas de TM/V5 responden enérgicamente a estímulos que se mueven en una dirección específica. Las neuronas de otras zonas del lóbulo parietal responden cuando el animal presta atención a un estímulo o pretende moverse hacia él.

Los primeros experimentos revelaron un hecho sorprendente: muchas neuronas comprendidas en trayectorias visuales, tanto en V1 como en niveles superiores de la jerarquía de procesamiento, todavía responden con su selectividad característica a estímulos visuales, incluso en animales totalmente anestesiados (con los ojos quietos aunque abiertos). No cabe duda de que el sujeto animal (o humano) no es consciente de toda su actividad nerviosa.

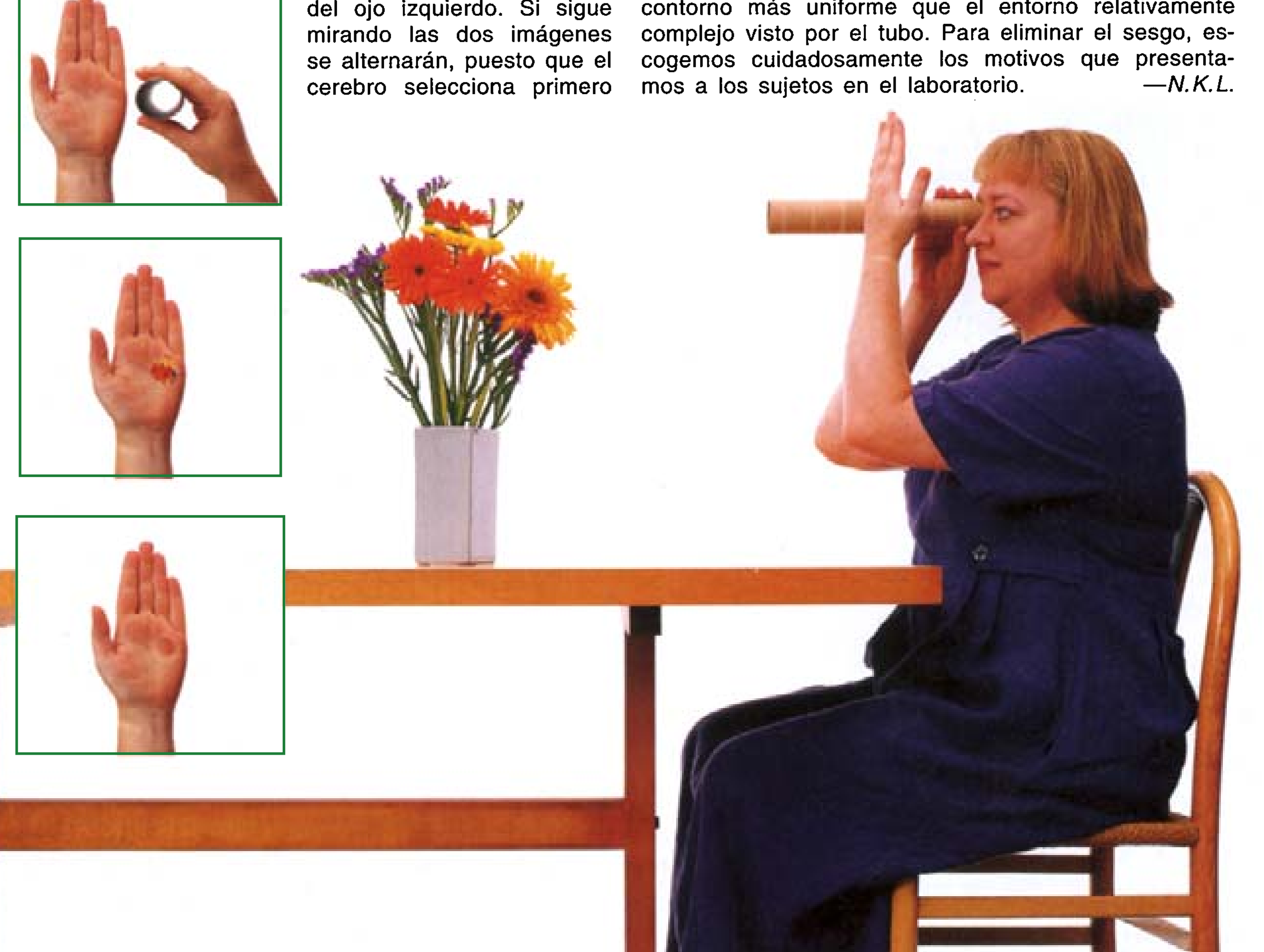
Esta observación plantea la cuestión de si el estado de consciencia pueda obedecer a la activación de ciertas regiones del cerebro o grupos de neuronas especiales. El estudio de

Experimentos de rivalidad binocular

Para simular la rivalidad binocular, basta con sostener con la mano derecha el eje hueco de un rollo de toallas de papel aplicado a su ojo derecho. Delante de su ojo izquierdo, a unos diez centímetros y tocando el tubo, abra su mano izquierda con la palma hacia usted.

Al principio parecerá que la mano tiene un agujero, pues el cerebro se concentra en los estímulos que recibe el ojo derecho. Pero al cabo de unos segundos el "agujero" se rellena con una percepción borrosa de la palma entera procedente del ojo izquierdo. Si sigue mirando las dos imágenes se alternarán, puesto que el cerebro selecciona primero los estímulos visuales percibidos por un ojo y después los que percibe el otro. Sin embargo, la alternancia está un tanto desequilibrada: probablemente percibirá el estímulo visual que llega por el tubo más a menudo que la palma de la mano.

Dos razones explican el sesgo o preferencia. Primero, la palma está desenfocada por estar mucho más próxima al rostro, y en la rivalidad binocular las imágenes precisas (como las flores vistas a través del tubo) tienden a preponderar sobre los estímulos visuales borrosos. Segundo, la palma de la mano es una superficie bastante lisa, con menos contraste y contorno más uniforme que el entorno relativamente complejo visto por el tubo. Para eliminar el sesgo, escogemos cuidadosamente los motivos que presentamos a los sujetos en el laboratorio. —*N.K.L.*



la rivalidad binocular en primates activos y adiestrados nos permite aproximarnos a esta cuestión, al menos en cierta medida. En tales experimentos, se le presentan al animal diversos estímulos visuales, por lo común patrones o figuras proyectados en una pantalla. Ofreciendo como premio zumos de frutas es fácil adiestrar a los primates para que señalen con exactitud el estímulo que perciben.

Durante el experimento se utilizan electrodos para registrar la actividad de las neuronas comprendidas en las trayectorias del procesamiento visual. Las neuronas varían notablemente en la intensidad de la respuesta ante estímulos idénticos que se presentan a ambos ojos a la vez. Así, por ejemplo, el patrón de estímulo A podría provocar actividad en una neurona, mientras que el patrón B no la provocaría.

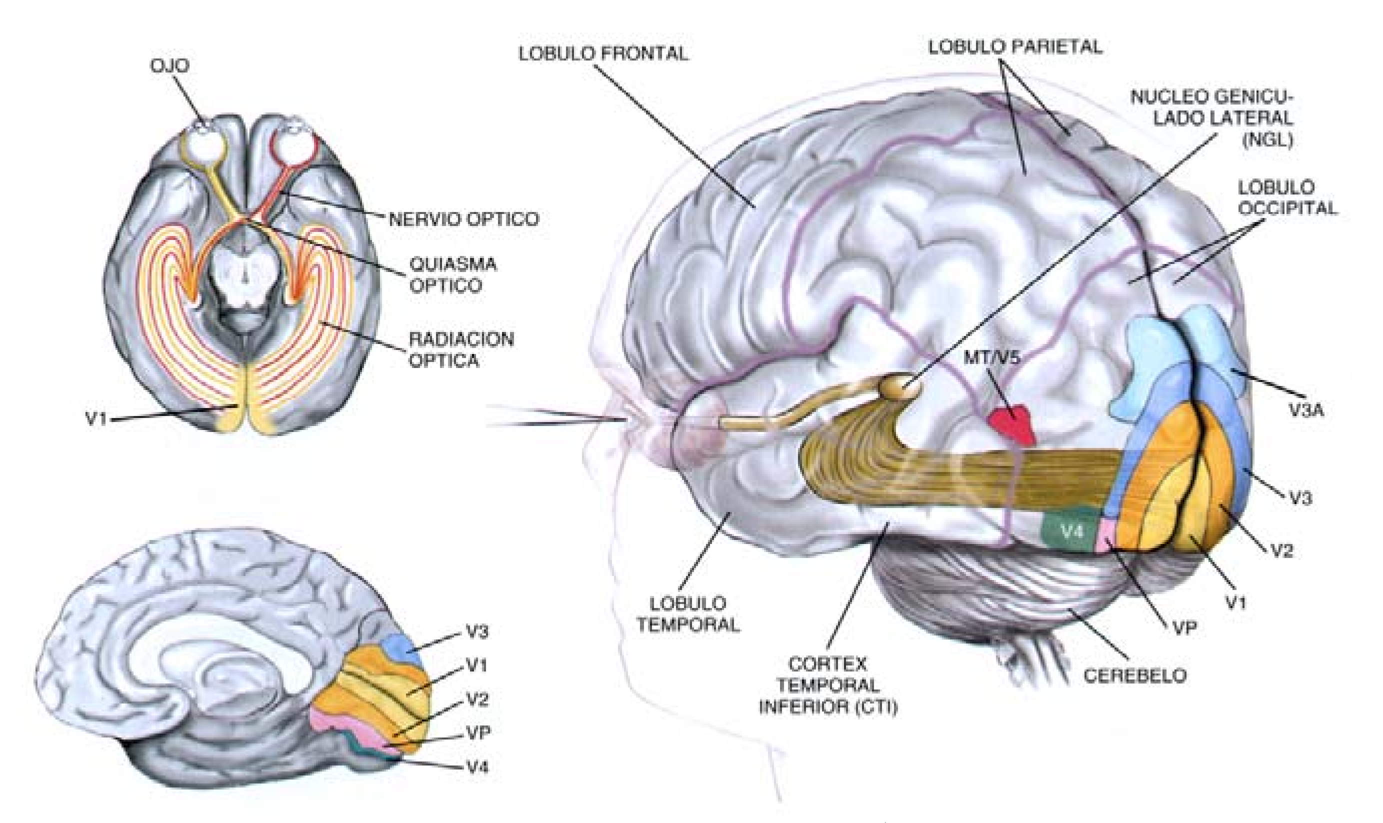
Una vez identificados un estímulo eficaz y otro ineficaz para una determinada neurona (por presentación simultánea del mismo estímulo a ambos ojos), los dos estímulos pueden disponerse de tal manera que cada ojo vea uno diferente. Es de esperar que el primate, a semejanza del humano en tal situación, sea consciente de los dos estímulos rivales alternativamente. Y esto es lo que nos cuentan las respuestas del primate cuando le presentamos estos pares de estímulos rivales. El registro del estado de las neuronas durante presentaciones sucesivas de los pares en competencia permitirá evaluar cuáles son las neuronas que sólo cambian su actividad si se modifican los estímulos, y cuáles alteran su frecuencia cuando el animal señala un cambio de percepción que no va acompañado de un cambio en los estímulos.

Con Jeffrey D. Schall, hoy en la Universidad Vanderbilt, realicé una versión de este experimento en la cual un ojo veía una retícula que ascendía lentamente mientras que el otro ojo veía una retícula en lento descenso. Tomamos registros en la zona visual TM/V5, cuyas células tienden a responder al movimiento. Pudimos ver que algo más del 40 por ciento de las células de esa zona variaban su nivel de actividad cuando el primate indicaba que su percepción había cambiado de ascenso a descenso, o a la inversa. La mayoría de esas células se encontraban en las capas más profundas de TM/V5.

El porcentaje medido era más bajo de lo esperado, puesto que casi todas las neuronas de TM/V5 son sensibles a la dirección del movimiento. En su gran mayoría, estas neuronas se comportaron de modo bastante análogo a las neuronas de V1, permaneciendo activas cuando su estímulo preferido estaba en el campo de visión de uno u otro ojo, se percataran o no del mismo.

No acabaron ahí las sorpresas. Cerca del 11 por ciento de las neuronas examinadas se excitaban cuando el primate señalaba que percibía el estímulo más eficaz de un par ascenso/descenso para la neurona en cuestión. Paradójicamente, una proporción similar de neuronas se excitaba al máximo cuando el estímulo más eficaz no se percibía, aun cuando fuera claramente visible para un ojo. De otras neuronas no era posible determinar si preferían un estímulo al otro.

En la Facultad de Medicina Baylor, David A. Leopold y yo estudiamos las neuronas de las partes del cerebro que sin duda desempeñan un papel relevante en el reconoci-



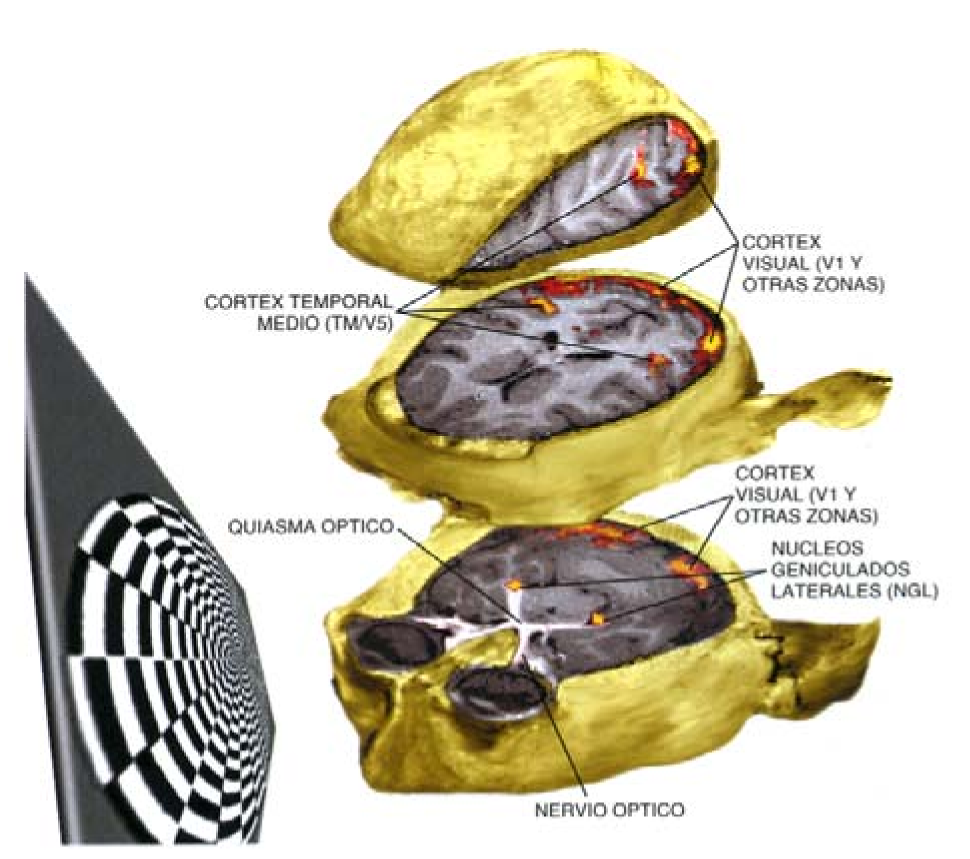
3. LA TRAYECTORIA visual humana comienza en los ojos y se extiende a través de estructuras interiores del cerebro antes de ascender a las diversas regiones del córtex visual (V1, etcétera). En el quiasma óptico, los nervios ópticos se entrecruzan parcialmente de manera que cada hemisferio cerebral recibe información de ambos ojos. Actúa como filtro de esa información el núcleo geniculado lateral, formado por capas de células nerviosas tales que cada una de ellas sólo responde a los estímulos de un ojo. El córtex temporal inferior es importante para distinguir las formas. Se ha descubierto que algunas células de cada zona sólo se excitan cuando la persona o el primate adquiere consciencia de un determinado estímulo.

miento de objetos. Registramos actividad en V4, V1 y V2, mientras los animales contemplaban estímulos que consistían en líneas inclinadas hacia la izquierda o hacia la derecha. En V4, la proporción de células cuya actividad reflejaba la percepción era similar a la que Schall y yo habíamos encontrado en TM/V5, en torno al 40 por ciento. Pero una vez más, había un grupo sustancial de neuronas que se excitaban mejor cuando no se percibía su estímulo preferido. Por el contrario, en V1 y V2 menos del 10 por ciento de las células se excitaban exclusivamente al percibir el animal su estímulo más eficaz, y si tal estímulo no se percibía no se excitaba ninguna.

En el CTI la configuración de actividad es totalmente diferente. Junto con David L. Sheinberg —quien también me acompañó en el traslado de Baylor al Instituto Max Planck— he analizado los registros de esa zona tras haber enseñado a los primates a que señalen sus percepciones cuando se les exponen patrones complejos de rivalidad visual, tales como imágenes de humanos, animales y diversos objetos artificiales. Pudimos comprobar que un 90 por ciento de las neuronas respondían con viveza al percibir su patrón preferido, pero inhibían su actividad cuando no se les presentaba ese patrón. Parece, pues, que cuando las señales visuales llegan al CTI, la gran mayoría de las neuronas responden de una manera vinculada a la percepción.

Para estudiar sujetos sometidos a rivalidad binocular, Frank Tong, Ken Nakayama y Nancy Kanwisher, de la Universidad de Harvard, han utilizado la técnica de formación de imágenes por resonancia magnética funcional (RMf); ese medio proporciona imágenes de la actividad cerebral midiendo los incrementos de circulación sanguínea en determinadas zonas del cerebro. Descubrieron así que el CTI estaba particularmente activo cuando los sujetos señalaban que veían imágenes de rostros.

En resumen, en las primeras etapas de la trayectoria visual la mayoría de las neuronas indicaban en su respuesta si tenían o no a la vista su estímulo visual preferido, aunque algunas se comportaban de un modo que pudiera relacionarse con cambios en la percepción del animal. En las últimas etapas del procesamiento, sin embargo, la proporción de células cuya actividad reflejaba la percepción del animal se elevó hasta el 90 por ciento.



4. ACTIVIDAD CEREBRAL de un primate anestesiado al que se le presenta un estímulo visual giratorio, de alto contraste (*izquierda, abajo*). Estas imágenes tomadas por resonancia magnética funcional revelan que, incluso cuando el primate permanece inconsciente, sus zonas de procesamiento visual están activas; entre ellas los núcleos geniculados laterales (NGL), el córtex visual primario (V1) y el córtex temporal medio (TM/V5).

Una posible objeción es que las variables percepciones señaladas por los primates en el curso de la rivalidad binocular podrían obedecer a que el cerebro suprima información visual al principio de la trayectoria, primero de un ojo y luego del otro, de modo que el cerebro perciba una sola imagen en cualquier momento. Si esto fuera verdad, el cambio de actividad nerviosa y de percepciones no representaría más que la conmutación entre uno y otro ojo de la información percibida, y no tendría relevancia para la consciencia visual en otras situaciones. Pero la experiencia es decisiva: durante la situación de rivalidad, la aportación de ambos ojos se procesa continuamente en el sistema visual.

Sabemos esto porque, en el caso de los humanos, la rivalidad binocular produce la alternancia lenta normal de percepciones, aun cuando los estímulos en competencia se conmuten rápidamente —varias veces por segundo— de un ojo al otro. Si la rivalidad se redujera a que el cerebro atienda a uno o a otro ojo, el fenómeno se desvanecería al conmutarse con tal rapidez los estímulos. (El observador vería más bien una célere alternancia de los estímulos.) El hecho de que el régimen de lenta alternancia de percepciones persista cuando se conmutan los estímulos es un firme indicio de que la rivalidad se debe a la competencia de las representaciones alternadas del estímulo en la trayectoria visual. La rivalidad binocular nos ofrece entonces la oportunidad de estudiar cómo decide el sistema visual lo que vemos, aun cuando ambos ojos vean (casi) una misma cosa.

¿Qué nos enseñan estos descubrimientos acerca de la consciencia visual? En primer lugar, que no somos conscientes de muchas actividades de nuestro cerebro. Desde hace tiempo sabemos que apenas nos damos cuenta de la actividad cerebral que mantiene el cuerpo en posición estable, una de las funciones más antiguas en términos de evolución. Hemos comprobado asimismo que tampoco nos enteramos de gran

Primates y experimentadores

A los experimentos descritos en el artículo cabe objetar que los primates podían caer en la tentación de hacer trampas para ganarse su sabrosa recompensa. Al fin y al cabo, no podemos saber directamente lo que un primate (o una persona) piensa o percibe en un momento dado. A nuestros primates les interesa sobre todo beberse el zumo, antes que entender cómo se despierta la consciencia a partir de la actividad nerviosa; es, por tanto, posible que hayan desarrollado una estrategia de respuesta que parezca reflejar sus verdaderas percepciones, pero que en la realidad no sea así.

En la sesión de adiestramiento presentada como ejemplo, el primate debía tirar de la palanca izquierda sólo en el caso de ver la esfera solar, y de la derecha sólo cuando viera la cara de un vaquero. Nos cercioramos de que el primate seguía dando las indicaciones co-







parte de la actividad nerviosa que generan —al menos parcialmente— nuestras experiencias conscientes.

Podemos afirmar esto porque muchas neuronas de nuestro cerebro responden a estímulos de los que no somos conscientes. Sólo una pequeña parte de las neuronas parecen aptas para desempeñar lo que los fisiólogos llaman "correlato nervioso" de la percepción consciente, es decir, responder de una manera que refleje con seguridad la percepción.

Y todavía hay más. El reducido número de neuronas cuyo comportamiento acusa la percepción está distribuido por toda la trayectoria visual, en vez de radicar en una sola zona del cerebro. Por supuesto, las neuronas que reaccionan así abundan mucho más en el CTI que en otras zonas cerebrales, pero en experimentos futuros podrían hallarse neuronas de ese tipo en otros lugares.

Además, tal vez otras regiones del cerebro sean responsables de decisiones producidas por estímulos de cualquier clase que alcancen la consciencia. El grupo encabezado por Erik D. Lumer, del Colegio Universitario de Londres, ha analizado en humanos esta posibilidad por medio de la RMf. Comprobaron así que el lóbulo temporal se activa en éstos durante la experiencia consciente de un estímulo, como ya habíamos visto en los primates. Pero hay otras regiones, como las zonas corticales parietal y prefrontal, que se activan precisamente en el momento en que el sujeto señala un cambio del estímulo.

Conociendo mejor dónde se localizan y cómo se interconectan las neuronas que se correlacionan con la experiencia consciente, sabremos más acerca del proceso de generación de la consciencia en el cerebro. No obstante, los descubrimientos realizados hasta hoy indican claramente que la consciencia visual no puede considerarse el producto final de una serie jerarquizada de etapas de procesamiento. Por el contrario, involucra la trayectoria visual entera, así como las zonas parietales frontales que intervienen en el procesamiento cognitivo superior. La actividad de una apreciable minoría de neuronas refleja lo que se ve de una manera consciente, incluso en los niveles más bajos que hemos examinado, los de V1 y V2; en los niveles superiores de la trayectoria lo único que aumenta es la proporción de neuronas activas.

Todavía no está claro si la actividad de las neuronas de las zonas más iniciales de la trayectoria viene determinada por sus conexiones con otras neuronas de aquellas zonas o si es consecuencia de conexiones jerarquizadas de arriba abajo, a manera de "realimentación", desde los lóbulos temporal o parietal. Ciertamente, la información visual circula desde los niveles superiores hacia los inferiores, tanto como en el sentido inverso. Los estudios teóricos indican que los sistemas con este tipo de realimentación pueden presentar pautas de comportamiento complicadas, incluso múltiples estados estables. Los diferentes estados estables mantenidos por la realimentación pueden corresponder a distintos estados de la consciencia visual.

Sería importante saber si la actividad de cualquiera de las neuronas que hemos identificado determina verdaderamente la percepción cons-

deben jugar limpio

rrectas intercalando casos en los que no se presentaban estímulos en rivalidad (*abajo*). En tales ocasiones había una respuesta "correcta" a lo que se percibía, y si el primate no respondía así se suspendía inmediatamente la prueba (y la oportunidad de ganar más vasos de zumo). De modo análogo, si el primate tiraba de una u otra palanca cuando se le presentaba la mezcla de imágenes del Sol y el vaquero superpuestas (*último cuadro*), sabíamos que nos estaba mintiendo para beber más zumo.

Nuestros resultados indican que los primates señalan sus experiencias con exactitud. Aún más convincente es nuestra observación de que primates y humanos sometidos a prueba con el mismo instrumental se comportan a niveles similares en tareas diferentes.

—N.K.L.







ciente de un animal. Cabe desde luego imaginar que estas neuronas están simplemente controladas por alguna otra parte desconocida del cerebro que determine la experiencia consciente.

Los ingeniosos experimentos realizados por el grupo que dirige William T. Newsome, de la Universidad de Stanford, sugieren que, al menos en una zona de TM/V5, la actividad nerviosa puede muy bien determinar directamente lo que percibe el primate. Newsome identificó primero las neuronas que responden selectivamente a un estímulo en movimiento hacia una determinada dirección, y luego las activó artificialmente mediante débiles corrientes eléctricas. Los primates acusaron la percepción del movimiento que correspondía a la activación artificial, aun cuando los estímulos no se movieran en la dirección indicada.

Interesará ver si hay neuronas de diferentes tipos, en el CTI y tal vez en niveles más profundos, que también intervengan directamente en la transmisión de la consciencia. Si existen, cabe esperar que la estimulación o la desactivación transitoria de esas neuronas modifique la percepción que notifica el animal durante la rivalidad binocular.

Para explicar mejor la consciencia visual habrá también que considerar los resultados de experimentos sobre otros procesos cognitivos, tales como la atención o la memoria operativa. Las pruebas de Robert Desimone en el Instituto Nacional de Salud Mental en Bethesda revelan una notable semejanza entre las interacciones competitivas observadas durante la rivalidad binocular y los procesos que intervienen en la atención. El grupo de Desimone enseñó a los primates a señalar cuando veían estímulos sobre los que habían recibido indicaciones previas. También aquí muchas neuronas respondieron de una manera que dependía del estímulo que el animal esperaba ver o del sitio donde esperaba verlo. Es obvio el interés de averiguar si esas neuronas son las mismas que las que sólo se activan cuando llega a la consciencia un patrón contemplado en rivalidad binocular.

Comienza a emerger de estos estudios una concepción del cerebro como un sistema cuyos procesos crean estados de consciencia, que no sólo responden a excitaciones sensoriales sino también a señales internas que representan expectativas fundadas en experiencias anteriores. En principio, los científicos tendrían que saber determinar las redes que sustentan estas interacciones. Es una tarea ingente, pero ha comenzado bien con el éxito logrado en la identificación de las neuronas que reflejan un estado de consciencia.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE ASTONISHING HYPOTHESIS: THE SCIENTIFIC SEARCH FOR THE SOUL. Francis Crick. Scribner's, 1994.

EYE, BRAIN AND VISION. David H. Hubel. Scientific American Library, 1995.

THE VISUAL BRAIN IN ACTION. A. David Milner y Melvyn A. Goodale. Oxford University Press, 1996.

Reinas que capturan esclavas

En el mundo de las hormigas la vida está teñida de golpes de mano, muertes y aprehensión de rehenes. La batalla entre reinas constituye una forma de parasitismo social

Howard Topoff

En el mundo animal, depredadores y parásitos viven a expensas de otras especies. Pero no tienen la misma prensa. Sobre mi mesa de trabajo llueven las solicitudes de ayuda económica en defensa de los lobos o de las orcas. Jamás he visto una camiseta que luzca la leyenda "Larga vida para las tenias". La culpa la tiene el prejuicio que asocia el estilo de vida parásito con enfermedades. Está extendida la idea de que el parásito es un organismo furtivo que se introduce en nuestro cuerpo y, a diferencia de un honrado depredador, nos corroe lenta e inexorablemente.

Sin embargo, existe una forma de parasitismo bastante menos macabra. El parasitismo social, que así se llama, ha seguido un curso evolutivo independiente en seres tan dispares como las hormigas y las aves. La hembra del cuco, por ejemplo, pone su huevo en el nido de la urraca, para que ésta lo cuide. En Norteamérica, ciertas especies del género *Molothrus*, que hacen lo propio, han evolucionado de manera que los huevos que producen son muy parecidos a los de las aves que utilizan de ama de cría.

Más rico que el repertorio de estas aves parasitarias es el desarrollado por las hormigas esclavizadoras. Basta con fijarse en el ejemplo perfecto de *Polyergus breviceps*. Durante 15 años he venido estudiando esta hormiga parásita en la Estación Experimental del Sudoeste que el Museo Americano de Historia Natural posee en Arizona. Igual que las cuatro especies de *Polyergus* restantes que hay en el mundo, éstas han perdido la

1. INCURSION ESCLAVIZADORA, protagonizada por *Polyergus*, en colonias de hormigas *Formica*. Se trata de una operación muy compleja. Las obreras de *Polyergus* irrumpen en un nido de *Formica* (*1*), y se hacen con las pupas que trasladarán a su nido y esclavizarán. Entretanto, las jóvenes reinas *Polyergus* se aparean en pleno fragor de la batalla; luego, cada una de ellas se separa para establecer su propia colonia (*2*). La reina recién fecundada lucha contra las obreras de *Formica* a la entrada de su guarida, a cierta distancia de su nido natal (*3*), avanza luchando hasta la reina *Formica* en la cámara inferior y la mata (*4*). Lamiendo la reina moribunda, *Polyergus* adquiere las substancias químicas que le servirán para enseñorearse de las obreras de *Formica*; se dispone a guardar sus propios huevos y los de la reina que acaba de morir (*5*).


3
4
5





2. PUPA DE *FORMICA* transportada por una obrera de *Polyergus* hasta el nido de *Polyergus* (*arriba*). Allí pasará a formar parte de la progenie que atienden las esclavas de *Formica* capturadas ya. En cada incursión de éstas participan unas 1500 obreras de *Polyergus* para transportar pupas (*derecha*). En el curso de una sola estación, un nido de *Formica* puede perder hasta 14.000 pupas capturadas por hordas de *Polyergus*.

capacidad de cuidar de sí mismas. Las obreras ni van a la búsqueda de comida, ni alimentan a los juveniles o a la reina, y ni siquiera se ocupan de la limpieza de su propio nido. Para sobrevivir, las obreras de *Polyergus* deben cazar obreras de *Formica*, que es un género emparentado, para que realicen dichas tareas. Con ese objetivo, las obreras de *Polyergus* llevan a cabo campañas de captura de esclavas; intervienen unas 1500, que viajan unos 150 metros, entran en un nido de *Formica*, expulsan sus obreras y reinas y se llevan las pupas.

De vuelta al nido de *Polyergus*, las hormigas esclavas se ocuparán de las pupas capturadas hasta que muden en adultos. Entonces, las obreras de *Formica* recién emergidas asumirán toda la responsabilidad del mantenimiento de la colonia mixta de ambas especies. Se ocuparán de ir por néctar y artrópodos muertos, de regurgitar alimento a los miembros de la colonia, de retirar los desechos y de excavar nuevas cámaras. Cuando la población alcanza un tamaño excesivo para las capacidades del nido existente, entonces las 3000 esclavas, más o menos, de *Formica* reunidas localizarán otro asentamiento y transportarán físicamente al nuevo nido las 2000 obreras de *Polyergus*, junto con los huevos, larvas, pupas e incluso la reina.

HOWARD TOPOFF empezó a interesarse por los insectos sociales cuando frecuentaba, en sus años de estudiante, el departamento de etología del Museo Americano de Historia Natural de Nueva York. Terminado el doctorado en 1968, ingresó en esa institución. Comparte su investigación con la docencia de psicología en el Colegio Hunter de la Universidad Municipal de Nueva York.

Esta organización de amos y esclavos no constituye ningún caso singular. De las aproximadamente 8000 especies de hormigas, al menos 200 han desarrollado algún tipo de relación de simbiosis con otra especie. En un extremo del segmento continuo de comportamientos se hallan los parásitos facultativos, como *Formica wheeleri*. Las hormigas de esta especie pueden cuidar de ellas mismas, aunque realizan incursiones periódicas para aprehender esclavas en colonias de otras especies de hormigas y así aumentar sus efectivos laborales. En el extremo opuesto, en el de los parásitos sociales obligados, se hallan *Polyergus* y otras especies de hormigas dulóticas. Ni las obreras ni la reina pueden sobrevivir sin la ayuda de esclavas.

Mi trabajo de campo sobre *Polyergus* se guiaba por un objetivo ambicioso: determinar las principales adaptaciones adquiridas en la evolución del parasitismo social obligado. Me he centrado en un comportamiento genuino de las hormigas *Polyergus*, a saber, el de la habilidad de la reina para adueñarse de un nido de *Formica* con un golpe de mano y sin ayuda. Sépase que, además de las grandes incursiones acometidas para capturar esclavas que observamos en otras especies de hormigas, *Polyergus* ha desarrollado una estrategia insólita que permite que la nueva reina establezca su propia colonia.

En la mayoría de las especies de hormiga, para establecer un nuevo nido se sigue un procedimiento bastante directo. Después de volar fuera de su colonia natal y de aparearse, la reina se desprende de las alas, excava

buscar comida, ni alimentan a sus crías o a la reina; ni siquiera limpian su propio nido.





3. UNA OBRERA DE *FORMICA* emerge de la pupa y se comporta como si fuera una *Polyergus*, pues es el único modo de vida que conoce. Se ocupa de cuidar las obreras y la reina *Polyergus*, alimentándolas, limpiando el nido e incluso trasladando el mismo si resulta pequeño para el número de inquilinos. Una colonia de 2000 *Polyergus* puede contener hasta 3000 esclavas *Formica*. Sin ellas, la colonia sucumbiría.

una cámara, pone unos cuantos huevos y alimenta sus larvas con comida almacenada. Cuando la progenie madura, las obreras adultas se hacen cargo inmediato del mantenimiento de la colonia. Pero una reina parásita *Polyergus* es incapaz de criar su primera progenie sin esclavas. De manera que se enfrenta a lo que pudiera parecer una misión imposible: invadir una colonia de *Formica*, matar a la reina residente y ser aceptada por las obreras. Además, debe abordar esa misión sin el auxilio de ninguna hormiga soldado.

Durante varias semanas al año, los cientos de huevos puestos por una reina de *Polyergus* establecida se desarrollan en machos y en reinas, que abandonan la colonia parental y se aprestan a formar una nueva. En la Estación Experimental de Arizona, las jóvenes reinas de *Polyergus breviceps* han renunciado incluso al rito sexual más tradicional en el mundo de las hormigas: el vuelo nupcial. En lugar de remontar el vuelo, las reinas aladas de *Polyergus* se unen con las obreras en una de las incursiones previstas para capturar esclavas. En medio del tumulto de un hormiguero avanzando, una de las reinas dispuestas a la cópula detendrá su marcha, atraerá un macho con una feromona de la glándula mandibular, se apareará y se desprenderá de las alas.

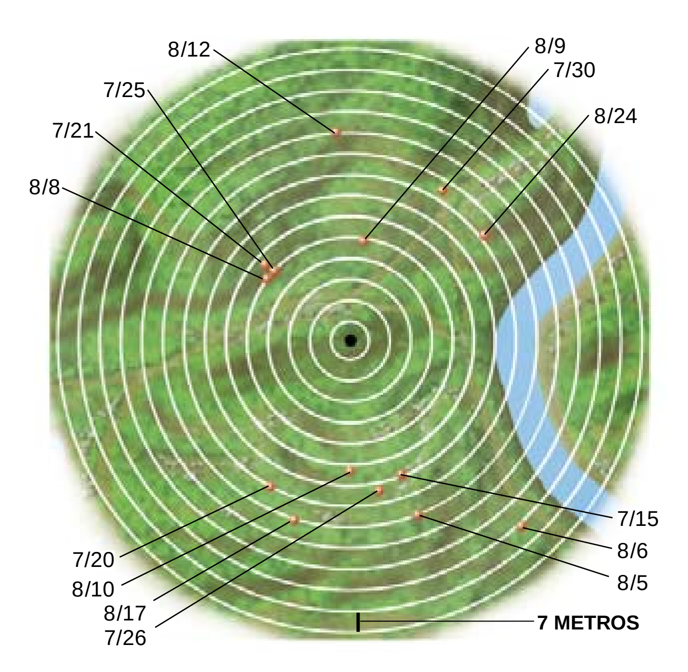
A partir de ese momento, la reina que acaba de ser fecundada dispone de dos estrategias posibles para fundar una colonia. La primera es continuar con la incursión de caza de esclavas; llegar a la colonia de *Formica* cuyas obreras y reina se hallan dispersas por el entorno. Tal desorganización podría facilitar la misión de la reina, pero el éxito dura poco, por la sencilla razón de que las colonias de *Polyergus* son extremadamente territoriales y no tolerarán que surja otra colonia de la misma especie en el tumulto de la incursión. La próxima vez que este nido (ahora usurpado) sea atacado por una colonia emparentada de *Polyergus*, la nueva reina *Polyergus* será destruida junto con cualquier obrera que haya podido producir.

La táctica alternativa para una nueva reina de *Polyergus* es fugarse de la columna invasora y localizar por su cuenta una colonia de *Formica* más alejada. Aunque no hay ninguna garantía, este comportamiento al menos aumenta las posibilidades de encontrar un nido hospedador fuera del territorio controlado por una población residente de *Polyergus*.

Máquinas asesinas

Tras descubrir un nido de *Formica* apropiado, empieza la parte más difícil del proceso de usurpación. Puesto que ocurre bajo tierra, no es posible la observación directa. Con mis doctorandos llevo a cabo la investigación sirviéndome de nidos de laboratorio transparentes. Para cada ensayo instalamos en el nido 15 obreras, 15 pupas y una reina de *Formica gnava*. (Por mor de comparación, en la naturaleza una colonia de *Formica gnava* consta de unas 5000 obreras.) Después situamos una reina de *Polyergus* recién fecundada cerca de la entrada del nido.

En la mayoría de los casos, la reina *Polyergus* descubre pronto la entrada e irrumpe en el nido con frenética y cruel actividad. Se abate directamente contra la reina de *Formica*, apartando a empujones a las obreras de *Formica* que intentan apresarla y morderla. En investigaciones



4. LOS NIDOS DE *FORMICA* (*rojo*) atacados suelen caer dentro de un radio de 150 metros de un nido de *Polyergus* (*centro*). Esta colonia concreta de *Polyergus* llevó a cabo 14 incursiones sobre 12 colonias de *Formica* en seis meses, entre el 15 de julio y el 24 de agosto.

anteriores habíamos comprobado que las adaptaciones defensivas principales de la reina *Polyergus* eran sus poderosas mandíbulas para morder a sus atacantes y una feromona repelente secretada por la glándula de Dufour, una estructura abdominal. Entre mordisco y mordisco, usa su lengua protráctil para lamer las partes heridas de su víctima moribunda. Pocos segundos después de la muerte de la reina, el nido experimenta una transformación muy notable. Las obreras de *Formica* se comportan como si estuvieran bajo los efectos de un tranquilizante. Se aproximan muy calmadas a la reina *Polyergus* y empiezan a cuidarla, de la misma manera que lo hacían con su propia reina. La reina *Polyergus*, a su vez, reúne en un montón a las pupas dispersas de *Formica* y se sitúa triunfante encima de él. En este momento, la usurpación de la colonia puede darse por hecha.

El festín real

Nuestro próximo objetivo fue descubrir la clave de este notable lavado de cerebro de las obreras de *Formica*. Se barajó la hipótesis de la "adquisición química", en virtud de la cual la reina *Polyergus* absorbe sustancias químicas de la reina *Formica* mientras la mata y lame. Para someter a prueba la hipótesis, Ellen Zimmerli y yo ideamos un subterfugio. Matamos a la reina *Formica* (congelándola y descongelándola) inmediatamente antes de introducir la hembra de *Polyergus*. Si andábamos en lo cierto, la reina *Polyergus* habría de atacar a la reina *Formica*, perforar su exosqueleto e ingerir sus fluidos corporales.

Que fue lo que ocurrió. Al entrar en el nido, la reina *Polyergus* saltó sobre la reina *Formica*, inmóvil, y empezó a morderla y a lamerla por espacio de unos 25 minutos, lo mismo que si estuviera viva. En cuanto acabó de "matar" a la reina *Formica*, la reina *Polyergus* empezó a recibir los cuidados de las obreras de *Formica*, ahora sumisas.

De acuerdo con esta hipótesis de la "adquisición química", sería difícil que las obreras de *Formica* se sometieran a una reina *Polyergus* sin la presencia de una reina *Formica* en el nido. Para comprobar tal predicción, extrajimos del nido a la reina *Formica* antes de introducir la hembra de *Polyergus*. La sustitución provocaba una lucha implacable entre las obreras de *Formica* y la reina *Polyergus*. Aunque ninguna de las dos especies posee aguijón, las obreras se valen de sus mandíbulas para asir a la reina intrusa por las patas y matarla a bocados.

Reina con obreras

En los nidos maduros de *Formica* acostumbra haber varias reinas, no así en las colonias de *Polyergus*. ¿Qué acontece cuando una reina *Polyergus* recién fecundada invade un nido poligínico? Para averiguarlo, establecimos una serie de colonias de *Formica* que alojaban de 2 a 25 reinas. Ante nuestro asombro, el número de reinas no ejercía ninguna influencia en la reina *Polyergus*. Aceptada una vez ha destronado y destruido a la primera reina *Formica*, no tiene prisa alguna. Hora a hora, día a día, va descubriendo y acabando de forma metódica con todas y cada una de las reinas *Formica*. No parece importarle tardar semanas en eliminar a sus contrincantes.

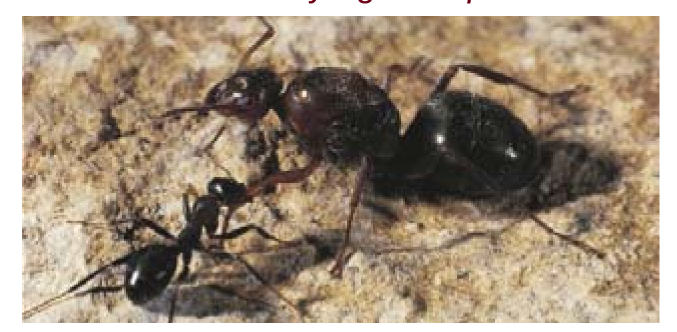
Aunque nuestras observaciones no han cubierto todas las adaptaciones protagonizadas por la reina *Polyergus*, hemos comprobado que no siempre sale triunfante. A veces, el ejército de obreras de *Formica* que le salía al paso era poderoso y la intrusa moría despedazada. Quizá, pensé, las reinas tendrían otra estrategia. Las épocas de cópula de *Polyergus* y de *Formica* se superponían. Parecía, pues, razonable proponer que, en alguna ocasión al menos, debían de encontrarse sobre el terreno poco después de la cópula. Supongamos que una reina *Polyergus* mataba a una reina *Formica* en el campo. Ya que habría adquirido las substancias químicas pertinentes, ¿podría la victoriosa *Polyergus* adentrarse en cualquier colonia de *Formica* impunemente? Sin ataques de las obreras que la detuvieran, esta reina podría embarcarse en su viaje asesino y eliminar a cualquier reina *Formica* residente.

Pero no es eso lo que se observa. Presentamos una reina *Polyergus* recién fecundada a otra reina de *Formica gnava* también recién fecundada. Casi ni se inmutaron. Ambas dedicaron algunos segundos a explorarse mutuamente con sus respectivas antenas, pero nunca observamos ni una sola interacción agresiva entre parejas de reinas.

De tales resultados cabía deducir que las reinas *Formica* jóvenes no poseen los mismos distintivos químicos que se hallan en reinas más maduras. Para averiguar cuándo una reina *Formica* adquiere el aroma de una reina establecida, diseñamos otro experimento. Christine A. Johnson y yo mantuvimos a varias reinas *Formica* recién fecundadas en nidos de laboratorio hasta que pusieron huevos. Repetimos entonces el ensayo anterior, pero tampoco observamos ninguna agresividad en la conducta de *Polyergus*. Tras varias semanas, de los huevos eclosionaron las larvas. Acometimos otra ronda de ensayos de enfrentamiento. Mas las reinas *Polyergus* seguían ignorando a las reinas *Formica*.

Para entender el misterio encerrado, había que ponerse en la piel de la hormiga. Supongamos que una reina

La reina Polyergus *va por un botín de sangre u otros fluidos corporales.*







5. UNA BATALLA REGIA entre sendas reinas, *Formica* (*arriba a la izquierda*) y *Polyergus* (*arriba a la derecha*). El lance puede durar más de 30 minutos. Con una talla similar e igualdad de condiciones, las reinas se asestan mutuos y repetidos mordiscos con sus poderosas mandíbulas. Si vence *Polyergus*, lamerá las heridas de la reina *Formica*, con lo cual adquirirá las substancias químicas que harán que las obreras *Formica* la consideren su monarca.

Polyergus recién fecundada entra en un nuevo nido y mata a una reina *Formica* que estaba criando su primera progenie de huevos o larvas. La reina invasora, incapaz de alimentarse y de nutrir a la progenie de la reina *Formica*, no tardaría en morir de hambre. El momento ideal para asesinar a la reina *Formica* empezaría cuando su progenie ya se hubiera desarrollado en obreras dispuestas a ayudar en la búsqueda de comida y en el mantenimiento del nido.

Johnson descubrió que, entre la fecundación de la reina *Formica* y el desarrollo completo de la primera progenie, transcurrían casi dos meses. En cuanto las ocho primeras obreras alcanzaron su plena capacidad, Johnson introdujo una reina *Polyergus* que había estado dirigiendo su propio nido de obreras *Formica*.

Pero la reina *Polyergus* permanecía pasiva. Pasaron cinco meses más, y había ya 19 obreras *Formica* presentes, cuando la reina *Polyergus* resolvió atacar a la reina *Formica*. A pesar de su desinterés anterior, estaba claro que la reina *Polyergus* retenía su inclinación y aptitudes regicidas. La reina *Formica* cayó muerta, y el puñado de obreras recién emergidas aceptó a la *Polyergus* como su nueva reina. Por consiguiente, dedujimos, las substancias químicas que identifican a la reina *Formica* deben cambiar drásticamente entre la fecundación y el momento en que tiene un nido establecido. Parece, sin embargo, que el cambio es una suerte de maduración basada en procesos internos, que no depende de la puesta. Con toda probabilidad, la elucidación de la naturaleza de esta transformación química sería un camino fructífero para estudios futuros.

Viviendo peligrosamente

Una vez determinado que la invasión de un nido establecido de *Formica* constituía la clave del éxito, quedaba por abordar una última cuestión, no menos espinosa. Linda Goodloe, doctoranda que trabajaba con la especie oriental *Polyergus lucidus*, había descubierto que las nuevas reinas atacan sólo a la especie de *Formica*

Segundos después de la muerte de la reina Formica*, la reina* Polyergus *reúne las pupas de aquélla en un montón y se coloca triunfante en la cima del mismo.*



6. REINA *POLYERGUS* aposentada sobre su botín. El futuro bienestar de la colonia dependerá de las esclavas *Formica* que emergerán. Aunque hay unas 200 especies de hormigas esclavizadoras, el caso de *Polyergus* es insólito por cuanto la reina actúa en solitario.

con la que han crecido, es decir, la esclavizada en la colonia parental. Pero el parasitismo social requiere interacciones conductuales complejas entre la especie parásita y la hospedadora. Sin duda, la evolución de una forma de vida libre a una parásita requirió que una reina recién fecundada invadiera el nido de una especie extraña. Aunque, en el mejor de los casos, resultaría una operación arriesgada, si fuera aceptada por las obreras de ese nido la reina intrusa podría poner más huevos de los que fuera capaz de cuidar por sí misma. A su vez, el rápido desarrollo de la colonia podría conducir a las condiciones apropiadas para incursiones esclavizadoras y a la impronta química necesaria para que las hormigas esclavas cuidaran de sus captoras.

Así pues, decidimos preparar un escenario donde cristalizaran esas posibilidades. Viajamos hasta una zona de alta montaña en que *Polyergus* lleva a cabo incursiones sobre nidos de *Formica occulta*, en vez de apropiarse de *Formica gnava*. Cazamos colonias de *Formica occulta*, las instalamos en nuestros nidos de laboratorio e introdujimos una reina recién fecundada de *Polyergus*; procedía ésta de una colonia que medraba a menor altitud, compuesta por esclavas de *Formica gnava*.

De acuerdo con lo previsto, los intentos de las reinas *Polyergus* para conquistar colonias de *Formica* que contenían obreras y reinas extrañas tuvieron un éxito sólo parcial. Cinco reinas *Polyergus* no mostraron ningún interés en atacar a las reinas de *Formica occulta*; tres de esas *Polyergus* indiferentes fueron abatidas por obreras de *Formica occulta*, y las otras dos evitaron el ataque abandonando el nido. Pero el resultado más significativo fue que dos de las siete reinas *Polyergus* tomaron y mataron a la reina *Formica* extraña. Y cuando acabaron de lamer la dirigente muerta, ambas reinas *Polyergus* recibieron la sumisión inmediata de las obreras de *Formica occulta*.

Significado evolutivo

En *El origen de las especies*, Charles Darwin se hace eco, a propósito de *Polyergus*, de las numerosas incógnitas que planteaba el parasitismo social; por ejemplo, qué pasa con las esclavas. Después de todo, una colonia de *Formica* puede perder más de 14.000 pupas durante una estación de invasiones. Según parece, no les queda más defensa "evolutiva" que la renovación de la progenie, gracias a la enorme capacidad reproductora de la reina *Formica*. Aunque incapaces de impedir su captura mientras son pupas indefensas, no está claro por qué las esclavas adultas no abandonan la colonia de *Polyergus* y se reúnen con sus compañeras de nido libres.

La respuesta está en la impronta. Las esclavas recién emergidas consideran de su familia a las obreras, progenie y reina *Polyergus*. Aunque no participan en incursiones contra nidos de otras *Formica*, las esclavas responden agresivamente a cualquier *Formica* con la que puedan encontrarse mientras van por comida. El proceso de impronta es similar al que ocurre con un patito y su madre, salvo los estímulos, químicos en las hormigas y no visuales ni auditivos. El hecho de que el parasitismo se desarrolle a partir de lazos químicos entre *Formica* y *Polyergus* sugiere que el término "esclavitud" es inapropiado para esos insectos. Un ejemplo antropomórfico más certero sería el de "adopción", ya que el nido de *Polyergus* es el único "hogar" que han conocido las obreras de *Formica*.

Si bien ciertas experiencias precoces pueden promover lazos sociales entre especies diferentes de hormigas, el desenlace del proceso resulta imprevisto. La capacidad para trenzar tales relaciones interespecíficas disminuye en paralelo con la distancia evolutiva entre las especies implicadas. En efecto, las relaciones parásito-hospedador se ajustan a la regla del entomólogo italiano Carlo Emery: los parásitos sociales son taxonómicamente próximos a sus hospedadores. No debe sorprendernos que ese parentesco genético esté conectado con una similitud ecológica, lo que es la quintaesencia de una relación parásito-hospedador satisfactoria. La asociación *Polyergus-Formica* funciona bien porque las obreras de *Formica* cuando están en un nido de *Polyergus* deben realizar las mismas actividades, de búsqueda de comida y de mantenimiento del nido, que realizarían en su propia colonia. El haber sido criadas en una colonia de *Polyergus* no cambia los comportamientos específicos de *Formica* en lo concerniente a búsqueda de comida, alimentación o lucha.

Desde la publicación de *El origen de las especies*, se ha visto en el parasitismo social de los insectos y las aves un ejemplo clásico de evolución convergente. Mis investigaciones de campo y de laboratorio sobre las principales adaptaciones del parasitismo de *Polyer-*

gus revelan la profundidad de esa convergencia. El cuco parasita varias especies de aves hospedadoras, aunque cada individuo se especializa en una especie hospedadora particular. ¿Cómo selecciona el cuco hembra la especie hospedadora apropiada? De una manera harto simple: utiliza el "método *Polyergus*" de impronta. Lo mismo que la reina *Polyergus* selecciona la misma especie de *Formica* presente en su nido cuando emergió, el cuco hembra parasita la especie que tuvo en el nido cuando nació.

Cuando oí, siendo estudiante, la expresión "parasitismo social" me pareció una contradicción en los términos. Después de todo, "social" denota comunicación, cooperación e incluso altruismo, significados antagónicos de los hábitos egoístas de los parásitos. Bien pensado, sin embargo, la expresión es justa, pues la infiltración de un parásito social en la vida del hospedador está basada en los mismos procesos de desarrollo y comunicación que usan, parásito y hospedador, para relacionarse con otros miembros de sus especies respectivas. Quince años de investigaciones han reforzado mi identificación intelectual con Darwin y sus esfuerzos por incorporar el parasitismo social en la teoría de la selección. El lo expresó mejor que nadie: "Intenté aproximarme al tema con mente escéptica; a cualquiera se le perdonará que dude de la existencia de un instinto tan extraordinario como el de esclavizar a otros."

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

COLONY TAKEOVER BY A SOCIALLY PARASITIC ANT, *POLYERGUS BREVICEPS*: THE ROLE OF CHEMICALS OBTAINED DURING HOST-QUEEN KILLING. Howard Topoff y Ellen Zimmerli en *Animal Behaviour*, vol. 46, tomo 3, páginas 479-486, septiembre 1993.

QUEENS OF THE SOCIALLY PARASITIC ANT *POLYERGUS* DO NOT KILL QUEENS OF *FORMICA* THAT HAVE NOT FORMED COLONIES. Howard Topoff y Ellen Zimmerli en *Journal of Insect Behavior*, vol. 7, n.º 1, páginas 119-121, enero 1994.

ADAPTATIONS FOR SOCIAL PARASITISM IN THE SLAVE-MAKING ANT GENUS *POLYERGUS*. Howard Topoff en *Comparative Psychology of Invertebrates*. Coordinado por Gary Greenberg y Etherl Tobach. Garland Publishing, 1997.

LA LUZ DE SINCROTRON

Las fuentes de luz de sincrotrón constituyen un instrumento indispensable para determinadas investigaciones, lo mismo en ciencia básica que aplicada. España contará pronto con una instalación de ese tipo

Josep Campmany, Joan Bordas y Ramón Pascual

El libro más traducido de la historia de la humanidad se abre con la afirmación de que en el principio Dios hizo la luz. Y la luz es, en efecto, uno de los fenómenos con que el hombre se halla más familiarizado. Pero tardó siglos en descifrar su naturaleza.

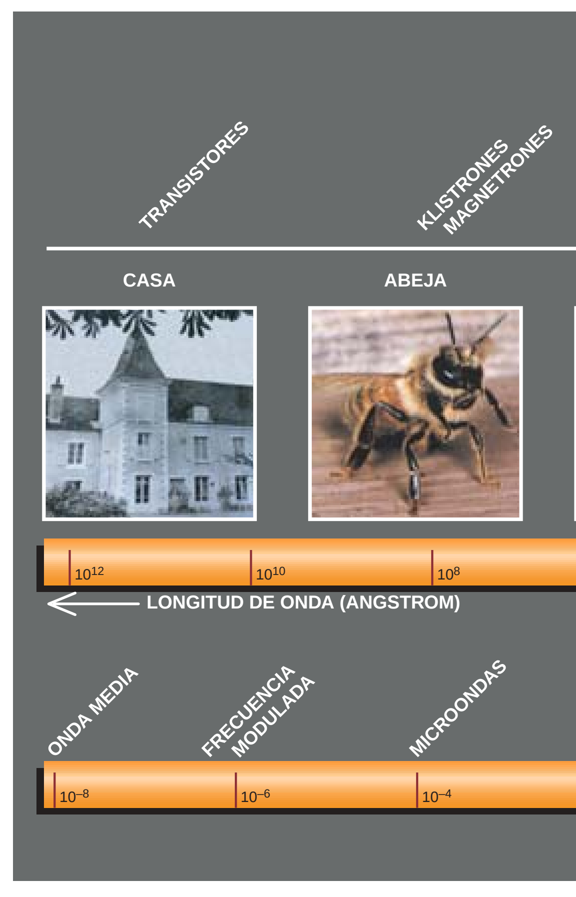
Un paso importante se dio en 1704 cuando Isaac Newton explicó en su *Optica* la descomposición de la luz solar en los colores del arco iris. A finales del siglo XIX Heinrich Rudolph Hertz descubrió que los haces luminosos son ondas electromagnéticas, cuya existencia había sido predicha, decenios antes, por James Clerk Maxwell, padre del electromagnetismo.

Las ondas electromagnéticas son campos eléctricos y magnéticos oscilantes; en cuanto tales, se caracterizan por su longitud de onda. Los valores que ésta adquiere conforman el espectro electromagnético. Así, la luz visible, la percibida por nuestros ojos, corresponde a longitudes de onda que abarcan desde los 700 nanómetros (1 nanómetro es igual a una millonésima de milímetro), dominio de la luz roja, hasta los 300 nm, de la luz violeta. Con longitudes de onda mayores que la del rojo están las ondas de radio, las microondas y las radiaciones infrarrojas; por debajo de la longitud de onda del violeta se suceden las radiaciones ultravioletas, los rayos X y los rayos gamma.

A medida que se ha ido profundizando en el conocimiento de la luz y de su espectro, se ha avanzado en un mejor uso y aprovechamiento de dicha radiación. Hoy nos resultaría difícil vivir sin ella. No hace falta remontarse a la energía que llega del Sol como factor desencadenante de la fotosíntesis, primer paso de nuestra existencia. La vida diaria entera depende de una forma u otra de luz, desde el radio-reloj que nos despierta hasta el ordenador del despacho del trabajo. Con todo, lo principal es que la luz nos permite "ver", recoger en nuestra retina la luz dispersada por el objeto que miramos. Nuestro cerebro se encarga luego de procesar las señales transmitidas desde la retina. Merced a esa facultad orgánica, el hombre comprende y controla su entorno.

Nuestra capacidad visual tiene un límite. Desde hace siglos, hemos ido retrayendo el umbral inferior con el uso de microscopios cada vez más potentes. Pero la percepción reforzada con un microscopio tiene su límite, inherente a la luz visible: la luz de determinada longitud de onda nunca nos permitirá discernir estructuras de dimensiones menores que ella. Dicho de otro modo, la luz visible no nos deja ver estructuras cuyas dimensiones sean menores que unos centenares de nanómetros.

Para superar esa dificultad recurrimos a radiaciones de longitud de onda menor: luz ultravioleta y, sobre todo, rayos X. Cierto es que entonces no podemos captar con los ojos la luz dispersada, ni reconstruir las imágenes en la retina, ni interpretarlas en el cerebro. Por retina se emplean entonces detectores capacitados para



1. PARA DISCERNIR UN OBJETO, es necesario iluminarlo con luz de una longitud de onda menor o igual a su tamaño. En la figura se ofrecen diversos objetos (desde una casa hasta un protón) junto a la banda del espectro electromagnético cuya longitud de onda es comparable a su tamaño. En el centro del espectro, se señala la banda de longitudes de onda que abarca la luz producida por un sincrotrón, que nos permite observar objetos cuyos tamaños van desde nanómetros (átomos) hasta micras (células).

La teoría electromagnética clásica predice la existencia de la LS. En el marco de esa doctrina, toda partícula portadora de carga eléctrica que experimente una aceleración o un frenado emitirá ondas electromagnéticas en un espectro continuo. Si, además, la partícula avanza a una velocidad próxima a la de la luz, la radiación se emite hacia adelante en un haz polarizado sumamente focalizado.

Los aceleradores de partículas no se construyeron para producir luz de sincrotrón, sino para alcanzar otros objetivos relacionados con la física nuclear y subatómica. En ese dominio, la radiación de sincrotrón constituía un dispendio enojoso, que debía reducirse al mínimo. ¿Cómo? Incrementando el perímetro de la circunferencia, pues la energía emitida disminuye al aumentar el radio de la circunferencia. Ese es el motivo de que algún acelerador utilizado en física de altas energías alcance los 27 kilómetros de perímetro que tiene el LEP de Ginebra.

Lo que los físicos de partículas consideraban un inconveniente, no tardaron otros en descubrir que era una excelente fuente luminosa para desentrañar la estructura de la materia.

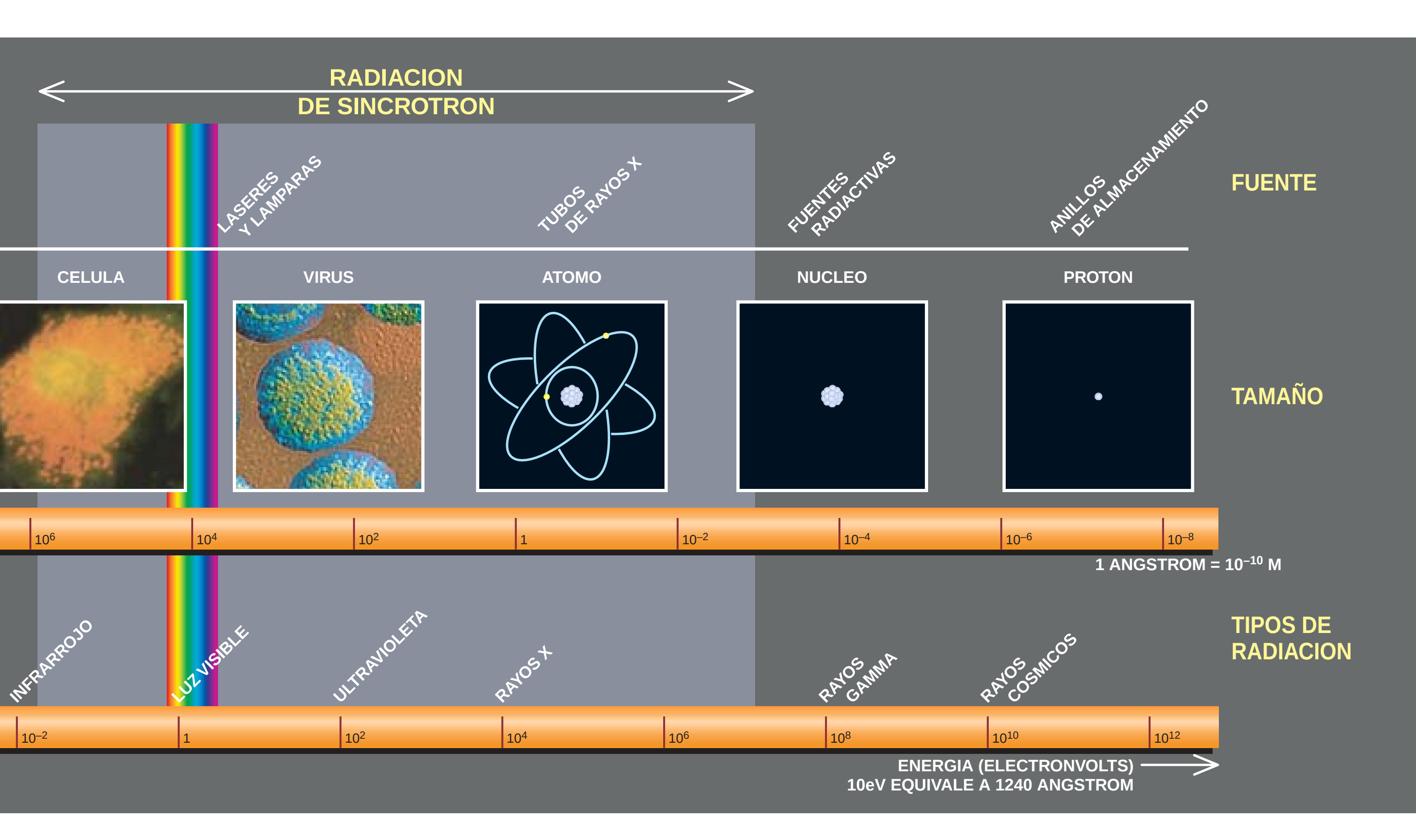
En 1963 se realizó una primera demostración experimental en el acelerador de la norteamericana Oficina Nacional de Pesos y Medidas, en Washington, donde se hizo un uso parasitario de la radiación, es decir, se limitaban a recolectar la luz emitida mientras el acelerador cumplía con su misión específica.

Los resultados fueron tan prometedores que, pasados unos años, se instalaron los primeros aceleradores dedicados a la producción de LS, con parámetros optimizados para que esa radiación pudiera destinarse al estudio de la materia. Se adelantó el Reino Unido, que en 1980 inauguraba el primer sincrotrón con ese fin. Desde entonces, se han construido más de un centenar de fuentes de luz de sincrotrón en distintos países.

Los sincrotrones son aceleradores de proporciones modestas. Su rendimiento crece con el grado de curvatura. Por lo común el perímetro varía de unas decenas de metros, para actividades muy específicas, hasta anillos de unos 300 metros, típicos de las fuentes modernas, las llamadas de tercera generación. En Europa, funcionan más de diez fuentes de distintas características, a las que hay que sumar otros dos sincrotrones en construcción y un par en proyecto. La distribución geográfica de estas instalaciones es desigual. Si se traza una recta que una París con Trieste, todas están por encima: el sudoeste europeo, donde se encuentra España, es un desierto.

A menudo se necesita luz de sincrotrón de unas características que caen fuera del alcance de las prestaciones medias. Para satisfacer esa demanda, Europa, Estados Unidos y Japón se han mancomunado, para abaratar costes, en la creación de fuentes complementarias. Hay tres ingenios de ésos, que suministran radiación de óptima calidad para experimentos específicos. Uno se encuentra en Grenoble (el ESRF, "European Synchrotron Radiation Facility"), otro en Nishi-Harima (el japonés SPRING-8) y el tercero en Argonne (el norteamericano APS). España participa en el ESRF.

La estructura de las fuentes modernas de LS presenta una configuración poligonal, con secciones curvas ocupadas por imanes dipolares que aceleran centrípetamente los electrones, confinan su trayectoria y provocan la emisión de LS. Las regiones curvas se co-



JOSEP CAMPMANY, JOAN BORDAS y RAMON PASCUAL trabajan en el proyecto de la fuente de luz de sincrotrón española. Campmany, que se doctoró en física por la Universidad de Barcelona en 1994, ha colaborado en el diseño de distintos componentes del proyecto. Bordas se doctoró en física en Cambridge en 1972. Tras permanecer en el Laboratorio Cavendish hasta 1977, se incorporó al Laboratorio Europeo de Biología Molecular de Hamburgo y lo dirigió hasta 1983. Regresó al Reino Unido, donde fue director de la fuente británica de luz de sincrotrón. Desde 1995 dirige el proyecto de Barcelona. Pascual es profesor de física teórica en la Universidad Autónoma de Barcelona, de la que ha sido rector. Es vicepresidente de la Comisión Promotora del Laboratorio del Sincrotrón desde 1993.

nectan a través de secciones rectas, donde se instalan los dispositivos de inserción. En dichos dispositivos, los electrones se ven obligados a describir un movimiento oscilante de distintas características según se trate de onduladores o de osciladores (*wigglers*).

El haz de luz emitida, o "línea de luz", llega a una estación de trabajo, donde el científico, de la disciplina que sea, realiza sus experimentos; por cuya razón cuenta con instrumentos ópticos, detectores y equipos de procesamiento. De esa radiación se benefician, entre otras disciplinas, la investigación de nuevos materiales, la biología, la química y la física.

Hay numerosos ejemplos de resultados que sólo pueden conseguirse con técnicas experimentales servidas por LS. Ocurre así cuando las mediciones precisan grandes cantidades de fotones y suelen coincidir con investigaciones punteras de ciencia básica o aplicada.

Si trabajamos en ciencia de materiales, nos serviremos de esa radiación para conocer el comportamiento de los cuerpos en las zonas críticas entre las fases gaseosa, líquida y sólida. En la luz de sincrotrón se apoya la comprensión de los fenómenos relacionados con la composición electrónica y atómica de los materiales, en especial de materiales magnéticos, catalizadores, semiconductores y superconductores; así como su variación con las influencias externas de altas presiones y temperaturas.

Muchos materiales carecen total o parcialmente de estructura cristalina. En algunos casos, su comportamiento depende de mínimas fases nanocristalinas o impurezas químicas (dopado). Para determinar



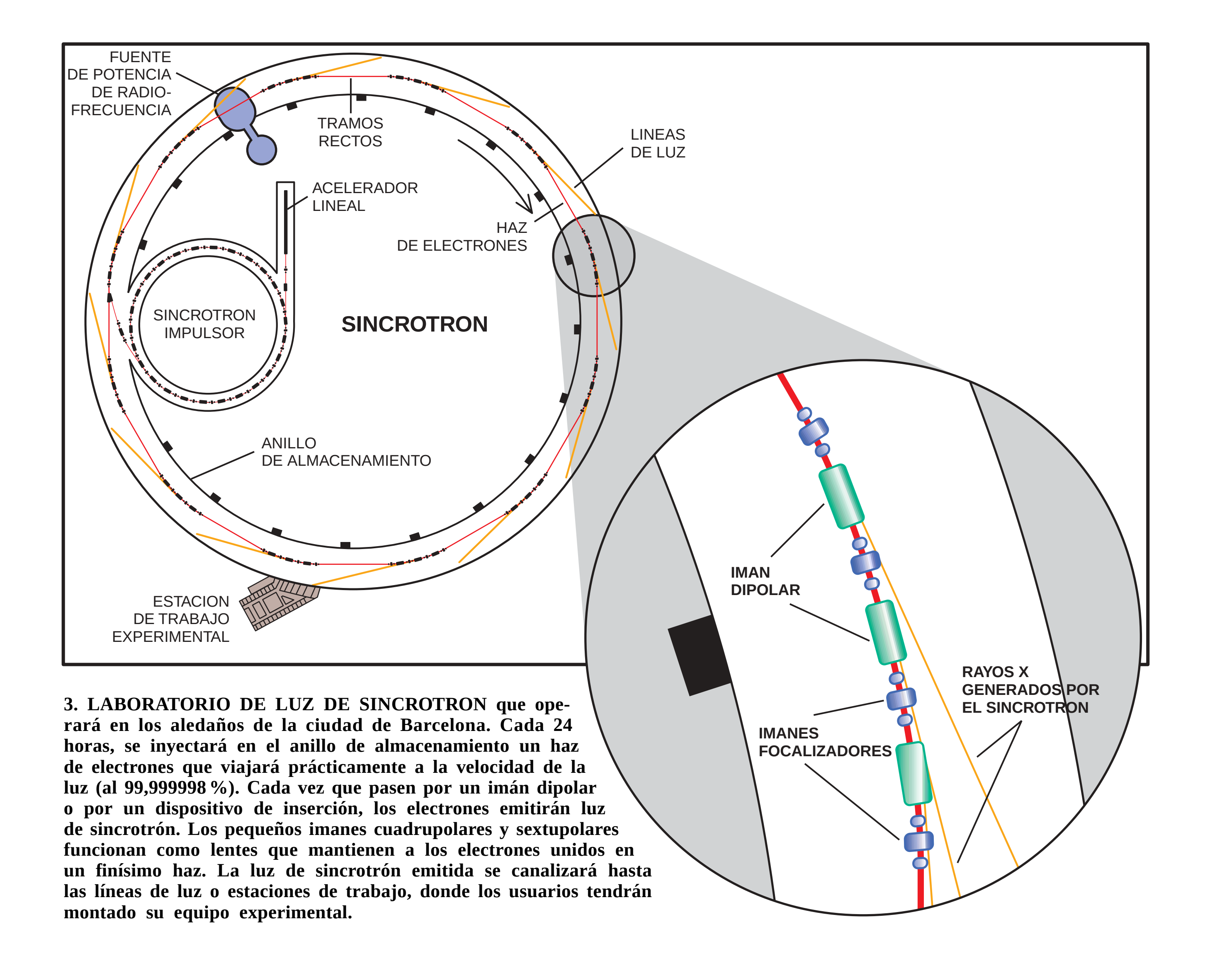
2. TODAS LAS INSTALACIONES de luz de sincrotrón de ámbito nacional que se hallan en Europa se encuentran ubicadas al norte de la línea imaginaria que une París con Trieste. La fuente de Grenoble es una colaboración europea. El desequilibrio territorial y la consiguiente pérdida de competitividad científica y técnica en el sur de Europa es evidente.

El proyecto de una fuente española de luz de sincrotrón

El gobierno autonómico catalán, en su Plan de Investigación 1993-1996, y en el de 1997-2000, se comprometió en la construcción de un laboratorio de luz de sincrotrón, el primero en España. Terminada la fase del anteproyecto, se publicó un estudio detallado en diciembre de 1997.

En ese trabajo se identificaron las necesidades de los potenciales usuarios (*véase* "Luz de sincrotrón. Primer acelerador español", por Josep Campmany, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto 1996, páginas 82-83). La conclusión fue que en España había más de 80 grupos interesados en esta herramienta, con más de 600 científicos de áreas muy diversas. La mayoría necesitaba luz intensa en la zona de los rayos X de energías entre 4 y 30 kiloelectronvolt (keV), y luz muy brillante en la zona de rayos X de energías entre 0,1 y 2 keV. (A efectos prácticos, la energía de un fotón en keV se obtiene dividiendo 1,24 por su longitud de onda en nanómetros.) España demandaba, pues, un sincrotrón de "tercera generación", esto es, con onduladores que generasen luz muy brillante en la región de rayos X blandos y osciladores que produjeran luz intensa en la región de rayos X duros.

El acelerador de electrones con imanes no superconductores dibujará una circunferencia de 250 metros; en él, la energía de los electrones almacenados será de 2,5 gigaelectronvolt, capaz de suministrar luz utilizable en un rango de energías de hasta 25 keV. El tiempo de vida del haz luminoso excede las 24 horas, con una fuente luminosa pequeña. A tenor del proyecto, de los 36 imanes dipolares, 24 actuarán como fuentes optimizadas de luz; se prevén 10 secciones rectas (de unos 7 m de largo), capacitadas para albergar dispositivos de inserción, generadores de luz más potente y concentrada.



3. LABORATORIO DE LUZ DE SINCROTRON que operará en los aledaños de la ciudad de Barcelona. Cada 24 horas, se inyectará en el anillo de almacenamiento un haz de electrones que viajará prácticamente a la velocidad de la luz (al 99,999998 %). Cada vez que pasen por un imán dipolar o por un dispositivo de inserción, los electrones emitirán luz de sincrotrón. Los pequeños imanes cuadrupolares y sextupolares funcionan como lentes que mantienen a los electrones unidos en un finísimo haz. La luz de sincrotrón emitida se canalizará hasta las líneas de luz o estaciones de trabajo, donde los usuarios tendrán montado su equipo experimental.

Beneficios colaterales de un sincrotrón

Aunque las fuentes de luz de sincrotrón son utilizadas principalmente por investigadores de ciencia básica, su aprovechamiento interesa también a la industria. De esa radiación se benefician los laboratorios farmacéuticos para el diseño de nuevos medicamentos. La industria alimentaria ha empezado a familiarizarse con su empleo para conseguir productos con propiedades agradables; el sector cosmético, para reforzar la eficacia de sus cremas y geles y suprimir efectos secundarios. De esa técnica pueden valerse los talleres de hilatura en busca de nuevas fibras sintéticas, las empresas de tratamiento de residuos interesadas en la optimización de los procesos, y un largo etcétera de empresas, siempre que cumplan una importante condición: estén dispuestas a invertir en investigación y desarrollo para asegurar su competitividad.

Junto al aprovechamiento directo, las fuentes de luz de sincrotrón estimulan el progreso técnico en las empresas que participan en su instalación, mantenimiento y mejora. Es éste un efecto reconocido y sumamente apreciado de las grandes instalaciones científicas. La industria se ve instada a suministrar nuevos productos que desarrollan conjuntamente con los equipos técnicos responsables del proyecto. Ese "know how" constituye un activo muy importante en su ulterior actividad. Téngase presente que en la apertura y puesta en marcha de un laboratorio de sincrotrón intervienen empresas de obras públicas, de informática, electrónica y control, de imanes y aparatos de precisión, de fuentes de alimentación y ultra-alto vacío, etcétera.

No se parte de la nada. Algunas empresas españolas han comenzado a colaborar con el sincrotrón de Barcelona. Se trata hasta ahora de la realización del prototipo de imán dipolar, de una fuente de potencia de alta estabilidad, de un banco de medidas magnéticas y del diseño de la cámara de vacío. Al adquirir nuevos conocimientos se les han abierto nuevos mercados. La empresa constructora del prototipo de imán dipolar ha participado con éxito en licitaciones de laboratorios extranjeros. Lo que también ha ocurrido con la empresa encargada de la fuente de alimentación necesaria para el electroimán: la fuente de potencia más precisa nunca construida en España, de 1500 ampères y con una precisión de 100 partes por millón. Otra empresa de precisión ha construido un banco de medidas magnéticas para calibrar el imán; la calidad del banco ha propiciado su elección para el calibraje y control de calidad de toda la serie de imanes, de 7 toneladas cada uno, que una empresa británica ha construido para otra fuente de luz de sincrotrón que actualmente se está construyendo en Karlsruhe.



PROTOTIPO DE IMAN DIPOLAR, fuente de alimentación y banco de medidas magnéticas montado en el laboratorio de luz de sincrotrón, durante una comprobación de la calidad del campo magnético producido por el imán. Prototipo, fuente y banco de medidas fueron construidos por empresas españolas según las especificaciones detalladas por el Laboratorio de Luz de Sincrotrón.

captar la radiación proveniente de la muestra; en vez del cerebro, los ordenadores reconstruyen y procesan las imágenes.

Junto a la luz natural de origen estelar el hombre ha aprendido a extraer luz de otras fuentes, desde el fuego hasta las lámparas incandescentes, fluorescentes o láseres. Y no sólo ha desarrollado fuentes de ondas electromagnéticas del espectro visible. En la porción no visible se utilizan las antenas para frecuencias radioeléctricas, los klistrones y magnetrones para las microondas.

Para ver un objeto, éste debe recibir un intenso haz de luz de una longitud de onda igual o menor que la estructura que deseamos observar. Si queremos percibir los componentes atómicos o moleculares de la materia, habrá que disponer de una fuente luminosa con longitudes de onda mucho menores que las de la porción visible del espectro. Asimismo, cuanto más intensa sea la luz, mayor contraste ofrecerá la muestra observada.

La única fuente artificial que produce luz intensa en el segmento del espectro que se extiende del infrarojo a los rayos X es el sincrotrón de electrones, un tipo de acelerador de partículas. La intensidad de que hablamos multiplica miles de millones de veces la luz más intensa producida por las fuentes tradicionales.

En un sincrotrón las partículas cargadas describen trayectorias circulares a velocidades próximas a la de la luz. A esa celeridad los haces de partículas emiten chorros de luz de sincrotrón (LS) que salen tangenciales a la órbita del recorrido. Los aceleradores son auténticas fábricas de fotones, los cuantos del campo electromagnético.

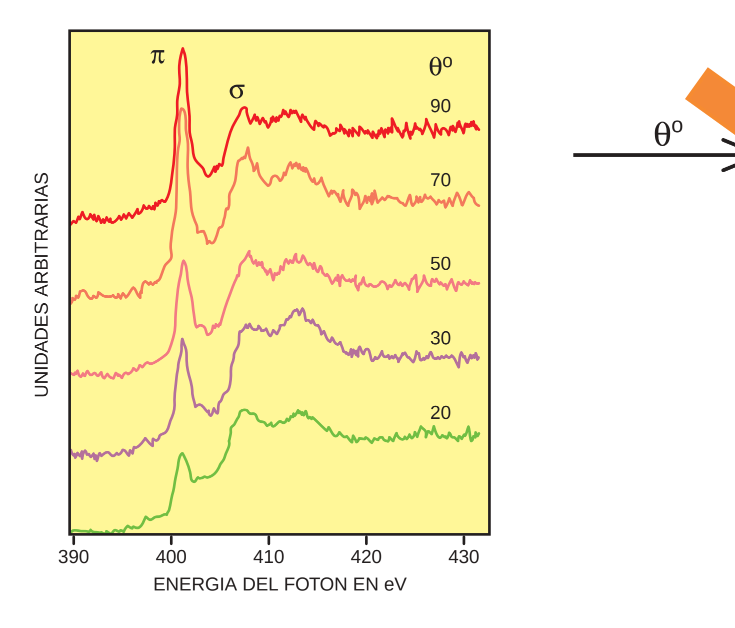
de forma rutinaria de qué modo esa mínima alteración del entorno atómico influye en el rendimiento del material, o para establecer su estructura tridimensional mediante técnicas no invasivas de formación de imágenes, es necesario disponer de radiación de sincrotrón.

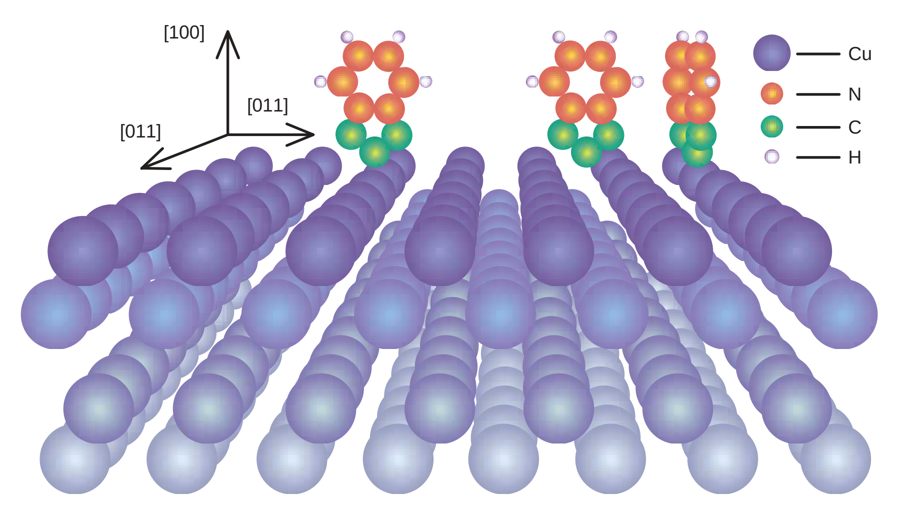
A menudo, en la química de los elementos de la segunda y tercera fila de la tabla periódica resulta decisiva una monocapa superficial o una interfase. El análisis mediante rayos X del carbono, el oxígeno y el nitrógeno (elementos de la segunda fila) y la orientación de las especies moleculares exigen una fuente de luz polarizada de gran intensidad, como la LS. Gracias a ésta, nos es dado aumentar la precisión, diversificar los métodos y avanzar en la comprensión de procesos relacionados con la mejora de adhesivos y lubricantes, cubrimientos anticorrosivos, alteración electroquímica de superficies, recubrimientos hidrofóbicos y otros tratamientos.

La luz de sincrotrón se halla presente en el campo del magnetismo. Emplea éste ahora técnicas exclusivas de la LS, como el dicroísmo circular magnético de rayos X blandos, fundado en la absorción selectiva de los materiales según la dirección de la polarización. Estas técnicas ofrecen posibilidades únicas. En el aspecto teórico, por ejemplo, la separación espectroscópica entre componentes orbitales y componentes de espín de los elementos magnéticos permite crear nuevos modelos; en su vertiente aplicada, la radiación de sincrotrón abre el camino para obtener imágenes de dominios magnéticos de películas delgadas y de monocapas. Tales dominios constituyen componentes esenciales de sensores y dispositivos de almacenamiento de datos; sirven también para detectar *in situ* las microestructuras magnéticas. La utilización de dispositivos de inserción especiales, que producen LS en el espectro de los rayos X blandos, es ideal en estas aplicaciones.

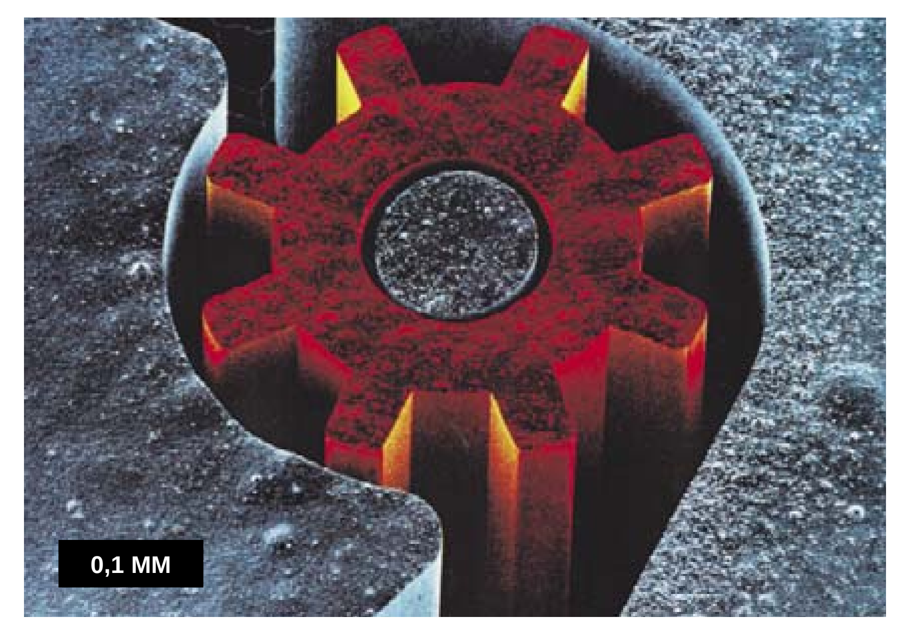
El rendimiento de polímeros y cerámicas tiene mucho que ver con la microestructura de los mismos, es decir, considerados a escala micrométrica. Con los métodos habituales no podemos obtener una resolución fina del proceso de formación; hemos de limitar nuestro análisis a la caracterización de los estados inicial y final del proceso. Mediante el uso de luz de sincrotrón, sí podemos discriminar y seguir, paso a paso, las diferentes etapas del proceso, que determinarán la calidad del producto. Ello se debe a que el tiempo de adquisición de datos va a la par que el proceso. Además, a menudo podemos resolver espacialmente la información estructural.

De ese modo, muchos procesos industriales, que hasta ahora dependían de la habilidad de los expertos y del azar, han ido ganando exactitud y predictibilidad con el uso de la LS. Si eso ha ocurrido en el terreno de los polímeros artificiales, en no menos cuantía se ha beneficiado el dominio de los polímeros naturales. Importantes avances en la determinación de los entornos inmediatos de los centros metálicos de macromoléculas se han logrado mediante el uso de técnicas espectroscópicas de rayos X; éstas sólo se pueden aplicar con fuentes de LS. Los metales se hallan involucrados en la transcripción del ADN, en la fotosíntesis y en otros mecanismos enzimáticos. Las técnicas espectroscópicas permiten la determinación de la estructura en torno a un centro metálico con una





4. APLICACION de la luz de sincrotrón a la química de superficies. Las técnicas de espectroscopía de absorción de rayos X polarizados permiten conocer la acción de los inhibidores de corrosión (en este caso, benzotriazol) sobre superficies metálicas (en este caso, cobre), mediante la determinación directa de la orientación de las moléculas del inhibidor con respecto a la estructura cristalina de la superficie. Estos resultados no se habrían podido obtener sin la polarización, el acceso a regiones espectrales vedadas por métodos tradicionales y el brillo de la luz de sincrotrón.



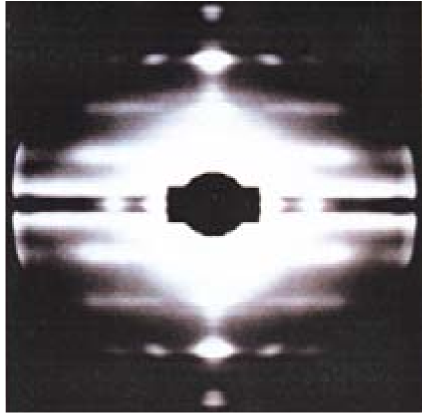
5. APLICACION de la luz de sincrotrón a la fabricación de componentes mecánicos. La técnica conocida como LIGA permite fabricar, con ayuda de la luz de sincrotrón, piezas mecánicas y dispositivos microscópicos. El tamaño de esta microturbina es menor que 1 mm. La precisión de construcción de tales microestructuras puede llegar a estar por debajo de la micra.

precisión de unos 0,002 nanómetros. Además, en principio, es posible usar estos métodos para determinar cambios en la química local de los centros metálicos durante una reacción bioquímica.

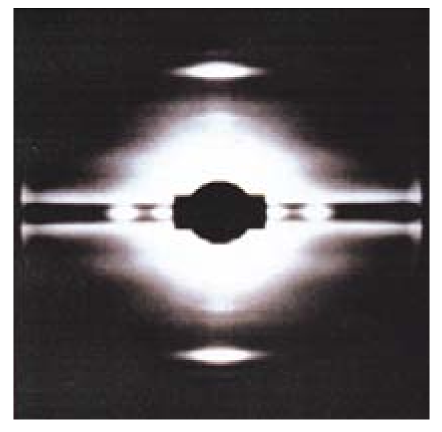
Con la luz de sincrotrón podemos abordar los cambios conformacionales operados en el ADN, proteínas y macromoléculas en disolución, su plegamiento y su autoensamblaje. Para investigar los cambios se emplean técnicas de dispersión de rayos X con resolución temporal; aunque parecidas a las técnicas espectroscópicas de dispersión de luz o turbidimetría, añaden la aportación de información estructural a nivel molecular. Ahora bien, la intensidad de la señal dispersada es muy débil; si queremos conocer la configuración de una proteína hemos de disponer de una resolución muy alta, nanométrica, lo que sólo se hará realidad con fuentes de LS.

Pasando de lo espacial a lo temporal, estas fuentes de radiación de sincrotrón permiten resoluciones temporales mejores que un milisegundo. Eso significa que podemos abordar estudios sistemáticos de dinámica estructural; siguiendo con el ejemplo de la proteína (podríamos haber optado por el ADN), se nos faculta para investigar la cinética estructural de su plegamiento.

Muchos complejos biológicos se extienden en configuraciones bidimensionales. Sea el caso de las membranas celulares. Los experimentos de difracción de rayos X a ángulo rasante, similares a los que se realizan en superficies inorgá-



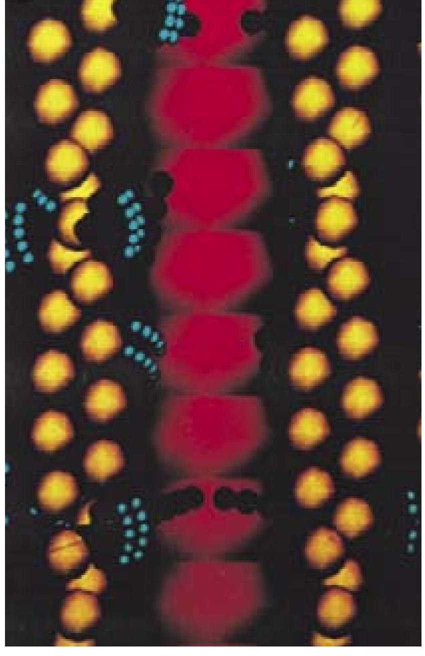
RELAJACION



CONTRACCION



RELAJACION



CONTRACCION

6. APLICACION de la luz de sincrotrón a la biología. Merced a técnicas de difracción de rayos X a bajo ángulo discernimos las estructuras moleculares de los filamentos musculares en estado de relajación (*izquierda*) y en estado de contracción (*derecha*). La determinación de las estructuras moleculares (*abajo*) se obtiene a partir de los diagramas de difracción (*arriba*) en cada estado.

La luz de sincrotrón

En el sincrotrón de Barcelona la luz que se aprovechará para realizar los experimentos provendrá de tres tipos de fuente: los imanes dipolares del anillo de almacenamiento, los onduladores, que son unos dispositivos de inserción, y los osciladores, también dispositivos de inserción.

El haz de luz emitido por los imanes dipolares dibujará una elipse cuyos ejes horizontal y vertical medirán 0,8 y 0,14 milímetros, respectivamente, con una dispersión angular vertical de 0,6 milirradianes. La luz emitida por estos imanes se hallará en el intervalo entre los 50 electronvolt y los 20 keV (ultravioleta y rayos X), con un brillo que oscilará entre 10^{14} y 10^{15} fotones por segundo y milímetro cuadrado y por milirradián al cuadrado, en un ancho de banda del 0,1 %.

El haz emitido por los onduladores tendrá forma de elipse de ejes 1,8 mm y 0,24 mm, con una dispersión angular de entre 0,1 y 0,4 milirradianes en uno y otro eje. La luz emitida por estos onduladores se extenderá por la región entre los 0,1 y los 4 keV (rayos X suaves) con un brillo que oscila entre 10^{18} y 10^{19} fotones en las unidades antedichas.

Por lo que respecta al haz emitido por los osciladores, será muy parecido al de los onduladores, con ejes de 1,8 mm y 0,20 mm, respectivamente, y una dispersión angular de 0,4 y 7 mrad en cada eje. La luz emitida se extenderá por encima de los 20 keV con un brillo o luminosidad superior a 10^{16} fotones.

De acuerdo con el proyecto, el Laboratorio de Luz de Sincrotrón admite muchas líneas de luz independientes, cada una con su propio equipo experimental y su utillaje especializado en un experimento concreto (espectroscopías, difractometrías, formación de imágenes y otros). Aunque la construcción de estas líneas dependerá de las necesidades de los usuarios, así como de las disponibilidades presupuestarias, el proyecto inicial incluye cinco líneas operativas a los 8 años de la aprobación del proyecto. Se trataría de las cinco siguientes: una línea de 50 a 630 electronvolt, para espectroscopías de absorción, reflexión y fotoemisión de rayos X de sólidos, gases, superficies e interficies; una segunda, en el rango de 200 a 1600 electronvolt, para espectroscopías de rayos X aplicables a experimentos de ciencia de superficies; una tercera línea en el rango de rayos X duros entre 7 y 26 kiloelectronvolt, para espectroscopías de rayos X, cristalografía de proteínas, difracción anómala o difracción de polvo, según el tipo de experimento; una cuarta, entre 4 y 12 kiloelectronvolt, destinada a espectroscopías de absorción, reflexión, fluorescencia, luminiscencia, difracción de polvo o cristalografía de macromoléculas; por último, una línea de luz de alta intensidad (8,4 y 13,8 kiloelectronvolt), que se podría aplicar a la difracción de muestras no cristalinas o de muestras cristalinas con celdas unitarias grandes, que requieren una longitud de onda de unos 0,1 nanómetros y un flujo luminoso lo más elevado posible.

nicas, proporcionan, por ejemplo, información directa acerca de la dinámica estructural del transporte de iones a través de la membrana. En esa situación no nos basta con las fuentes de luz habituales, dado el carácter tenue de la difracción de las señales.

Los músculos y otros sistemas biológicos se organizan en haces fibrosos. Cuando convierten la energía química en fuerza o movimiento, las estructuras fibrosas sufren cambios de configuración, rápidos y muy sutiles, que sólo la luz de sincrotrón nos deja ver. Gracias a su aplicación conocemos la secuencia temporal del patrón de difracción de rayos X de los músculos durante la contracción. Algunos cambios tardan menos de un milisegundo en producirse; sin LS no podríamos esclarecer la conversión de la energía química en fuerza y movimiento.

Un capítulo aparte merece la cristalografía de macromoléculas biológicas, como los virus. Los cristales de las macromoléculas tienen celdas unitarias grandes, cuyo análisis requiere haces de rayos X de un brillo que sólo la luz de sincrotrón puede ofrecer. Con la multiplicación de nuevas macromoléculas cristalizadas en el marco del proyecto del Genoma Humano, y su natural prolongación en el llamado Genoma Estructural, ha crecido la demanda de LS. Muy recientemente estas técnicas han permitido desentrañar la estructura atómica del ribosoma, la máquina biológica fabricante de las proteínas.

Por último, la fuente de luz de sincrotrón encierra en sí un notable valor industrial. Lo comprobamos con el Helios, fuente de LS compacta construida por Oxford Instruments, y con la comercialización de Euromono por VG-Fisons, ambos desarrollados en colaboración con el Laboratorio de Daresbury, instalado en los aledaños de Manchester. Ha resultado decisiva en los procesos litográficos LIGA, desarrollados en la fabricación de microcomponentes para implantes médicos y microcirugía.

Pero quizá la prestación más apreciada resida en la versatilidad científica de la luz de sincrotrón, su capacidad de aprovechamiento por investigadores de muy dispar procedencia y necesidades. Sin olvidar su fuerza impulsora de actividad empresarial.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SYNCHROTRON RADIATION RESEARCH. AN OVERVIEW. Arthur Bienenstock y Herman Winick en *Physics Today*, vol. 36, n.º 6, págs. 48-58; junio, 1983.

RADIACIÓN DE SINCROTRÓN. Herman Winick en *Investigación y Ciencia* n.º 136, págs. 38-48, enero de 1988.

SYNCHROTRON RADIATION SOURCES. Dirigido por Herman Winick en *World Scientific*, Singapore, 1994.

Journal of Synchrotron Radiation. Munksgaard, Copenhague.

LLS Detailed Design Report, 1997, http://www.lls.ifae.es/report/report.html.

El banco Grameen

Un experimento a pequeña escala iniciado en Bangladesh se ha convertido en una medida innovadora y de la mayor importancia para la erradicación de la pobreza

Muhammad Yunus



Tras muchos años de sufrimiento, Amena Begum se había resignado a una vida de pobreza absoluta y de maltratos de su marido. Su familia se contaba entre las más pobres de Bangladesh, una entre miles de desahuciados, que sobreviven ocupando sin permiso terrenos desolados y que malganan su pan trabajando de braceros.

A principios de 1993, Amena convenció a su marido para que se trasladasen a Kholshi, un pueblecito a 112 kilómetros al oeste de Dhaka. Amena confiaba en que la presencia de uno de sus parientes cercanos redujera el número y la dureza de las palizas que su marido le infligía. Siguió siendo maltratada, sin embargo, hasta que entró en contacto con el banco Grameen. Una vecina, Oloka Ghosh, le explicó a Amena que Grameen estaba formando un nuevo grupo en Kholshi y la animó a integrarse en él. Amena dudaba que nadie pudiera desear que ella formara parte de su grupo. Pero Oloka perseveró animándola con sus palabras. "Todos somos pobres —o al menos, todos lo éramos cuando ingresamos—. Yo estaré a tu lado, porque sé que tendrás éxito en el negocio."

El grupo de Amena se integró en un centro del banco Grameen en abril de 1993. Utilizó su primer préstamo de 60 dólares para poner en marcha un pequeño negocio de cría de pollos y patos. Cuando reembolsó su crédito inicial y empezó a preparar una solicitud para un segundo préstamo de 110 dólares, su amiga Oloka le dio un sabio consejo: "Dile a tu marido que Grameen no admite miembros que son apaleadas por sus cónyuges, ni les concede préstamos." A partir de ese día, Amena sufrió menos malos tratos a manos de su marido. En la actualidad, su negocio continúa creciendo y cubriendo las necesidades básicas de su familia.

A diferencia de Amena, la mayoría de los habitantes de Asia, Africa y América Latina tienen muy pocas oportunidades para escapar de la miseria. Según el Banco Mundial, más de 1300 millones de personas viven con menos de un dólar al día. La pobreza persiste arraigada 50 años después de que la Declaración Universal de Derechos Humanos afirmase que cada individuo tiene derecho a:

> Un nivel de vida adecuado para su salud y su propio bienestar y el de su familia, a la alimentación, el vestido, la vivienda, los cuidados médicos y los servicios sociales necesarios, así como el derecho a la seguridad en el desempleo, la enfermedad, la invalidez, la viudedad, la ancianidad u otras carencias necesarias para la vida en circunstancias que escapen a su control.

¿Seguirá la pobreza estando con nosotros dentro de 50 años? Mi propia experiencia sugiere que no tiene por qué ser así.

En 1972, recién doctorado en la Universidad Vanderbilt, regresé a Bangladesh para enseñar economía en la Universidad Chittagong. Estaba entusiasmado ante las posibilidades que se abrían para mi país, que acababa de alcanzar la independencia. Pero en 1974 sufrimos una tremenda hambruna. Enfrentado al salir de mis clases con la muerte y la inanición, empecé a poner en duda las teorías económicas



1. LA REUNION SEMANAL de prestatarias del banco Grameen en su aldea concluye con el recitado de los compromisos para llevar una vida mejor, más un saludo militar. Las asambleas son reuniones en las que las participantes solicitan, reciben o reembolsan préstamos, además de explicar la situación de los negocios que han emprendido. Este banco revolucionario, que nació en Bangladesh, puede jactarse ahora de tener 39.000 sucursales en pequeños pueblos y aldeas y 2,4 millones de prestatarios, en su enorme mayoría, mujeres. Aunque los solicitantes son demasiado pobres para ofrecer avales o garantías, el índice de devolución de los préstamos varía entre el 96 y el 100 por ciento.

que yo enseñaba. Había una enorme distancia entre la vida real de los pobres y los famélicos y el mundo abstracto de la teoría económica.

Quise saber cómo era la economía real de los pobres. Puesto que la Universidad Chittagong está ubicada en una zona rural, me resultaba fácil visitar los depauperados domicilios de Jobra, un pueblecito vecino. En el transcurso de muchas visitas, llegué a conocer casi todo sobre la lucha por la vida de mis vecinos y aprendí sobre economía muchas cosas que jamás son explicadas en las aulas. Me sentí desolado al ver cuánto sufrían los indigentes de Jobra porque no conseguían reunir mínimas cantidades de capital para los gastos ordinarios. Con frecuencia bastaba con menos de un dólar por persona, pero sólo aceptando condiciones leoninas podían llegar a conseguir esa minúscula cantidad. En la mayoría de los casos, la gente se veía obligada a vender sus bienes a prestamistas a los precios fijados por éstos.

Esta tragedia cotidiana me impulsó a la acción. Con la ayuda de mis alumnos de segundo ciclo, confeccionamos una lista de quiénes necesitaban pequeñas cantidades de dinero. En nuestra lista figuraban 42 personas. La suma total requerida era de 27 dólares.

Quedé conmocionado. En las aulas, se hablaba de millones de dólares con normalidad rutinaria. Estábamos en cambio despreciando las minúsculas sumas de capital que necesitaban 42 personas aptas y dispuestas a trabajar que vivían a nuestro lado. De mi propio peculio, presté los 27 dólares a las personas de mi lista.

Empero, eran muchos otros quienes podían beneficiarse de créditos. Decidí dirigirme al banco de la universidad y tratar de persuadir a sus directivos para que concedieran crédito a los pobres de la localidad. El gerente de la sucursal me dijo, sin embargo, que el banco no podría prestar dinero a los necesitados: los aldeanos, adujo, no ofrecían garantías. Me reuní con funcionarios de mayor rango del banco, con idénticos resultados. Sin otra solución, me ofrecí como avalista para conseguir los créditos.

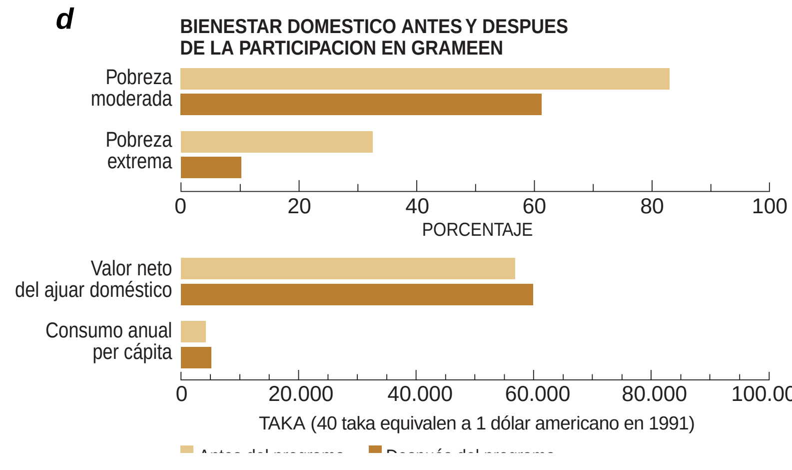
En 1976 solicité un préstamo del banco local y distribuí el dinero entre los individuos de Jobra más azotados por la pobreza. Todos los aldeanos, sin excepción, devolvieron sus préstamos. Pero el banco, ni aun ante esa prueba, estaba dispuesto a concederles un préstamo directo. Así que repetí mi experimento en otra aldea, y tuve éxito de nuevo. Seguí ampliando mi trabajo, de dos a cinco, a 20, a 50, a 100 aldeas, todo para convencer a los banqueros de que debían prestar a los pobres. A pesar de que cada vez que nos extendíamos a una nueva aldea se devolvían los préstamos, los banqueros seguían sin cambiar de opinión sobre quienes carecieran de avalista.

Puesto que no podía cambiar la actitud de los bancos, decidí crear un banco independiente para los pobres. Tras mucho trabajo y largas negociaciones con el gobierno, en 1983 quedó establecido el banco Grameen (o banco de la aldea, en idioma bengalí).

Desde el primer momento, se alzó sobre principios contrarios a la sabiduría bancaria tradicional. Buscamos prestatarios sólo entre los más pobres de los pobres, y no exigimos avalistas. El banco descansa sobre la fuerza de sus prestatarios. Se les exige que se unan al banco en grupos de cinco personas que ellos mismos constituyan. Los miembros del grupo se apoyan entre sí, prestándose ayuda mutua y consejo. Además, por constituir un grupo de iguales se refuerza la disciplina











2. LOS PRESTAMOS RECIBIDOS del banco (*a*) se utilizan en una variedad de pequeñas empresas, entre ellas, la cría de pollos (*b*) y la fabricación de cántaros de barro cocido que los aldeanos utilizan para guardar el agua potable (*c*). Los ingresos procedentes de tales microempresas tienen importantes efectos sobre el bienestar familiar de la prestataria (*d*). Antes de ingresar en el banco, el 83 por ciento de sus miembros eran extremadamente pobres. Pero una quinta parte de sus miembros han sido capaces de salir de la pobreza tras su participación en dicha entidad.

grupal, al evaluar la viabilidad de los negocios y asegurar las devoluciones de los préstamos. Si alguno de los miembros deja de pagar un préstamo, todos los miembros corren el riesgo de ver suspendida o reducida su línea crediticia.

La fuerza de los iguales

En el caso típico, un grupo nuevo tramita las solicitudes de crédito de dos de sus miembros, cada uno de los cuales necesita entre 25 y 100 dólares. Después de que estos dos solicitantes hayan reembolsado puntualmente sus cinco primeros plazos semanales, les llega a los dos miembros siguientes del grupo el turno de solicitar préstamos para sí. Una vez que hayan reembolsado sus cinco plazos, el último miembro del grupo puede formular su solicitud. Una vez reintegrados 50 plazos, la prestataria —pues suele ser una mujer— ha de pagar el interés correspondiente, que es algo superior a los tipos comerciales. La prestataria está ahora autorizada para solicitar un préstamo de cuantía mayor.

El banco no espera a que los prestatarios vayan a hacer sus ingresos en el banco: lleva el banco al pueblo. Los pagos de los préstamos se efectúan en reuniones semanales en las que participan de seis a ocho grupos, que tienen lugar en las aldeas y pueblos donde viven los miembros. El personal de Grameen asiste a estas reuniones, y es frecuente que visite los domicilios particulares de los prestatarios para ver cómo marchan sus negocios, trátese de la crianza de cabras, del cultivo de hortalizas o de la fabricación de utensilios de cetrería.

Grameen tiene sede en casi 39.000 aldeas de Bangladesh. Concede préstamos a unos 2,4 millones de solicitantes, que en un 94 por ciento son mujeres. El banco alcanzó sus primeros 1000 millones de dólares en préstamos acumulativos en marzo de 1995, a los 18 años de su fundación en Jobra. Sólo hicieron falta dos años más para superar la cifra de los 2000 millones de dólares. Al cabo de 20 años de trabajo, el importe medio del préstamo de Grameen se encuentra ahora en torno a los 180 dólares. El índice de reembolso oscila entre el 96 y el 100 por ciento.

Al cabo de un año de ingresar en el banco, el prestatario puede solicitar la compra de acciones de Grameen. Hoy, el 94 por ciento del banco es de sus prestatarios. De los 13 miembros de su junta directiva, nueve son elegidos entre los prestatarios; los demás son representantes del gobierno, profesores de universidad, el autor y otras personas.

Un estudio realizado por Sydney R. Schuler y sus colegas, pertenecientes a John Snow, un grupo de investigación privado, concluyó que un préstamo de Grameen concede cierto poder a la mujer, al aumentar su seguridad económica y su rango social en el seno de la familia. En 1998, un segundo estudio realizado por un equipo del Banco Mundial encabezado por Shahidur R. Khandker hizo notar que la participación en Grameen tiene asimismo un notorio efecto positivo sobre la escolarización y nutrición de los niños, siempre que sean las mujeres, y no los hombres, las receptoras de los préstamos. (Dicha tendencia quedó manifiesta desde los primeros días del banco, y es una de las razones por las que Grameen presta a mujeres: con excesiva frecuencia, los hombres gastan el dinero en sí mismos.) En particular, un aumento del 10 por ciento en los préstamos concedidos a mujeres dio por





3. LAS MUJERES ADQUIEREN MAYOR CONTROL sobre sus propias vidas al ser provistas de capital. Los ingresos de la mujer —ya los obtenga tejiendo cestos (*a*), encargándose de una tienda en su pueblo (*b*), tejiendo

e

IMPACTO DE GRAMEEN EN LOS INDICADORES DE NUTRICION INFANTIL

Aumento del perímetro del brazo*

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
PORCENTAJE

Aumento en la estatura*

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
PORCENTAJE

Chicas Chicos

**Variaciones asociadas a incrementos del 10 por ciento en los préstamos a mujeres.*

resultado que el perímetro del brazo —una medida corriente del estado de nutrición— de las niñas aumentase un 6 por ciento. Y por cada 10 por ciento de aumento en el préstamo concedido a uno de los miembros, la probabilidad de que su hija ingresara en una escuela aumentaba casi un 20 por ciento.

No todos los beneficios son consecuencia directa de los créditos. Al ingresar en el banco, a cada miembro se le exige que aprenda de memoria una lista de 16 resoluciones. Entre éstas figuran algunas normas de sentido común sobre la higiene y la salud —beber agua limpia, cultivar y comer hortalizas, excavar y utilizar pozos negros, y nociones similares—, así como el rechazo de ciertos dictados sociales (rehusar la dote y gestionar el número de hijos). Normalmente, las mujeres recitan la lista completa en las reuniones semanales de las filiales del banco; pero aparte de eso, tales resoluciones no son impuestas por ningún otro medio.

Aun así, el estudio de Schuler revelaba que las mujeres utilizaban procedimientos anticonceptivos con mayor regularidad después de ingresar en el banco. Curiosamente, parece ser que las mujeres que viven en aldeas donde opera Grameen, aunque no pertenezcan a esta organización, son también más proclives al control de la natalidad. La tasa de natalidad en Bangladesh ha descendido de forma impresionante en los dos últimos decenios, y es posible que la influencia de Grameen haya acelerado la tendencia.

En un año típico, un 5 por ciento de las prestatarias de Grameen —lo que supone unas 125.000 familias— superan económicamente el nivel que define la pobreza. Khandker llegó a la conclusión de que, entre estas personas, la pobreza extrema (un consumo inferior al 80 por ciento del mínimo estipulado por la FAO) disminuyó en más de un 70 por ciento en el plazo de cinco años desde su participación en el banco.

No es tarea fácil lograr que un programa de microcréditos cumpla sus objetivos sociales al tiempo que conserve solidez económica. Nos esforzamos en procurar que el banco sirva a los pobres. Sólo quienes viven por debajo de la mitad de la línea definitoria de la pobreza tienen derecho a solicitar préstamos. La mezcla de participantes paupérrimos con otros económicamente más solventes conduciría a que fueran éstos quienes dominasen los grupos. En la práctica, sin embargo, puede resultar difícil incluir a los más pobres, que podrían verse excluidos por sus iguales en el proceso de formación de los grupos de prestatarios. Y a pesar de nuestro empeño, ocurre en ocasiones que el dinero prestado a una mujer se lo apropia su marido.

Dado su tamaño y difusión, el banco Grameen ha ido creando, en su desarrollo, formas de supervisión de los directivos de las sucursales, para garantizar su honradez y la transparencia de su gestión. No les permite a los gerentes permanecer largo tiempo en un mismo pueblo, por temor a que puedan tender lazos locales que dificulten su ejecutoria. Además, los directivos no son nunca destinados a puestos cercanos a su residencia habitual. Tales impedimentos, sumados a la exigencia de que los directivos posean titulación universitaria, hacen que sean muy pocas las mujeres situadas en cargos de tal naturaleza. Por tal motivo, Grameen ha sido acusado de atenerse a esquemas paternalistas. Conscientes de esa posibilidad, tratamos

MUHAMMAD YUNUS, fundador y director gerente del banco Grameen, nació en Bangladesh. Se doctoró en economía por la Universidad Vanderbilt en 1970. En 1976 puso en marcha el proyecto Grameen, al que ha dedicado todo su tiempo durante los diez últimos años. Asesor del gobierno de Bangladesh, de las Naciones Unidas y otras organizaciones preocupadas por la pobreza, la condición de la mujer y la salud. Su labor humanitaria ha sido reconocida con numerosos premios y seis doctorados *honoris causa*.





en telares artesanales (*c*) o como telefonista para sus vecinos (*d*)— mejoran su posición en el seno familiar, le dan mayor control sobre su fertilidad y le permiten cuidar mejor de sus hijos (*e*). Las mujeres son también más responsables a la hora de devolver los préstamos. Por todas estas razones, los programas de microcréditos están orientados fundamentalmente hacia ellas. En momentos de dificultad los préstamos no se condonan, sino que se renegocian.

de cambiar la situación buscando formas nuevas de integración de mujeres en la plantilla.

No pocas veces, Grameen ha sido criticado también por no constituir una organización benéfica, sino una entidad con ánimo de lucro. Tal condición es esencial para su viabilidad. El año pasado, una desastrosa inundación arrasó los hogares, mató el ganado y supuso la pérdida de casi todas sus pertenencias a centenares de miles de prestatarios de Grameen. No hemos condonado las deudas, aunque sí las hemos renegociado y concedido a los prestatarios más tiempo para reembolsarlas. La condonación de deudas eliminaría el sentido de obligación y de responsabilidad, que constituyen elementos clave en el éxito del banco.

Liberación de su potencial

El modelo Grameen se ha extendido a 40 países. Su primera clonación, comenzada en Malaysia en 1986, atiende a 40.000 familias pobres; su índice de devolución de préstamos se ha mantenido sistemáticamente próximo al 100 por ciento. En Bolivia, los microcréditos han permitido a las mujeres la transición desde programas de "comida por trabajo" hacia la gestión de sus propias empresas. En el plazo de dos años, la mayoría de las mujeres del programa adquieren el historial crediticio suficiente y la destreza financiera adecuada para ser clientes de los bancos ordinarios. Las noticias llegadas de países pobres de todo el mundo reflejan éxitos similares. Estos bancos ponen sus miras en los más empobrecidos, prestan a grupos y, por lo general, a mujeres.

El banco Grameen de Bangladesh ha sido económicamente sibisuficiente desde 1995. Las instituciones similares de otros países van abriéndose paso hacia la autonomía financiera. También en los Estados Unidos están funcionando algunos programas, uno de ellos en Chicago. Desdichadamente, por ser los costos laborales mucho más elevados en los Estados Unidos que en los países en vías de desarrollo —que suelen tener una gran bolsa de desempleo de personas cualificadas— su funcionamiento es mucho más oneroso en ese país. En consecuencia, los programas estadounidenses se han visto obligados a depender de la subvención.

En total, unos 22 millones de personas pobres de todo el mundo tienen ahora acceso a pequeños créditos. Microcredit Summit, una institución que tiene su sede en Washington D.C., actúa de centro de recursos para las diversas instituciones regionales de microcrédito, y organiza congresos anuales. En 1998, los asistentes se comprometieron a proporcionar créditos a 100 millones de las familias más pobres en el año 2005. La campaña ha crecido para dar cabida a más de 2000 organizaciones, desde bancos, pasando por instituciones religiosas, hasta organizaciones no gubernamentales y agencias de las Naciones Unidas.

La metodología típica para el desarrollo económico de un país pobre pasa por una industrialización mediada por inversiones. Según esta concepción "de arriba abajo", la única forma de acabar con la pobreza es la creación de puestos de trabajo. Pero en gran parte del mundo desarrollado la creación de puestos de trabajo exacerba la emigración desde las zonas rurales hacia las urbanas, crea empleos mal remunerados y promueve condiciones de vida lamentables. Estoy firmemente convencido de que, por el contrario, la erradicación de la pobreza empieza por que las personas sean capaces de controlar sus propios destinos. La redención de los pobres no se conseguirá por la creación de empleos, sino dándoles oportunidades para desarrollar sus propias capacidades. Son infinidad las ocasiones en que he podido observar que los pobres no son pobres porque sean perezosos, carezcan de cualificación o no hayan acudido a la escuela, sino, simplemente, porque no pueden conservar para sí los verdaderos retornos que su trabajo genera.

Tal vez el autoempleo sea la única solución para tales personas: seres a quienes nuestras economías se niegan a dar ocupación y a quienes nuestros contribuyentes no están dispuestos a mantener. Los microcréditos consideran a cada individuo como un empresario en potencia y ponen en marcha los diminutos motores económicos de una porción de la sociedad que es rechazada. En cuanto un gran número de tales pequeños motores se ponga a trabajar, se podrá preparar el escenario para un enorme cambio socioeconómico.

Grameen, aplicando esta concepción, ha establecido más de una docena de empresas, frecuentemente, en

asociación con otros empresarios. Al ayudar a los microprestatarios y a los microahorradores a tomar la propiedad de grandes empresas e incluso de compañías de infraestructura, estamos tratando de acelerar el proceso de vencer la pobreza. Grameen Phone, por ejemplo, es una compañía de telefonía móvil que se propone dar servicio a las zonas rurales y urbanas de Bangladesh. Tras un estudio piloto en 65 aldeas, Grameen Phone ha aceptado un préstamo para extender sus actividades a todos los pueblos en los que el banco desarrolla su actividad. Alrededor de 50.000 mujeres, muchas de las cuales no han visto jamás un teléfono, y algunas, ni siquiera la luz eléctrica, se convertirán en proveedoras de servicio telefónico en sus aldeas. En última instancia, se convertirán en las propietarias de la compañía, adquiriendo sus acciones. Nuestra última innovación, Grameen Investments, permite que individuos estadounidenses participen en compañías como Grameen Phone, al tiempo que su inversión les proporciona una rentabilidad. Se trata de un paso importante para poner financiación comercial al servicio de la erradicación de la miseria.

Es responsabilidad de cualquier sociedad civilizada garantizar la dignidad humana a todos sus miembros y ofrecer a cada individuo la mejor oportunidad de revelar su creatividad. Recordemos que la pobreza no está creada por los pobres, sino por las instituciones y las políticas que nosotros, los mejor situados, hemos establecido. Podemos resolver el problema no por medio de las viejas ideas, sino por adopción de otras radicalmente nuevas.

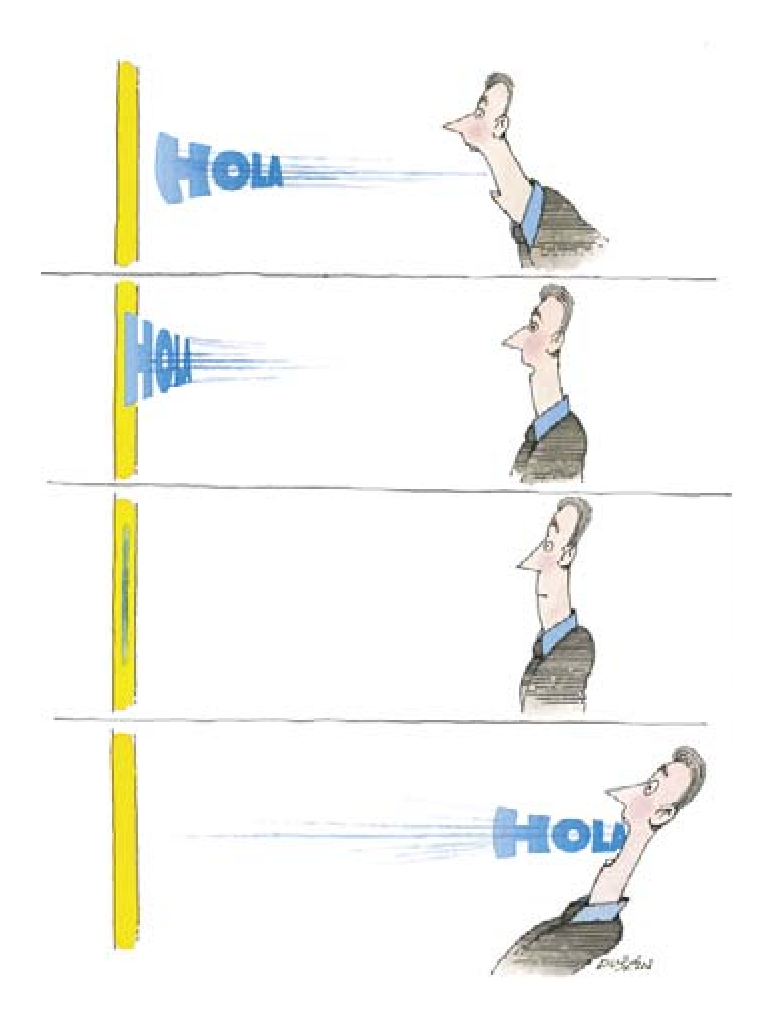
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GRAMEEN BANK: PERFORMANCE AND SUSTAINABILITY. Shahidur R. Khandker, Baqui Khalily y Zahed Khan. World Bank Discussion Papers, n.º 306 (artículos de debate del Banco Mundial). ISBN 0-8123- 3463-8. World Bank, 1995.

GIVE US CREDIT. Alex Counts. Times Books (Random House), 1996.

FIGHTING POVERTY WITH MICROCREDIT: EXPERIENCE IN BANGLADESH. Shahidur R. Khandker. Oxford University Press, 1998.

La sede del Grameen Bank en la Telaraña puede ser consultada en www.grameenfoundation.org.



ACÚSTICA DE TIEMPO INVERTIDO

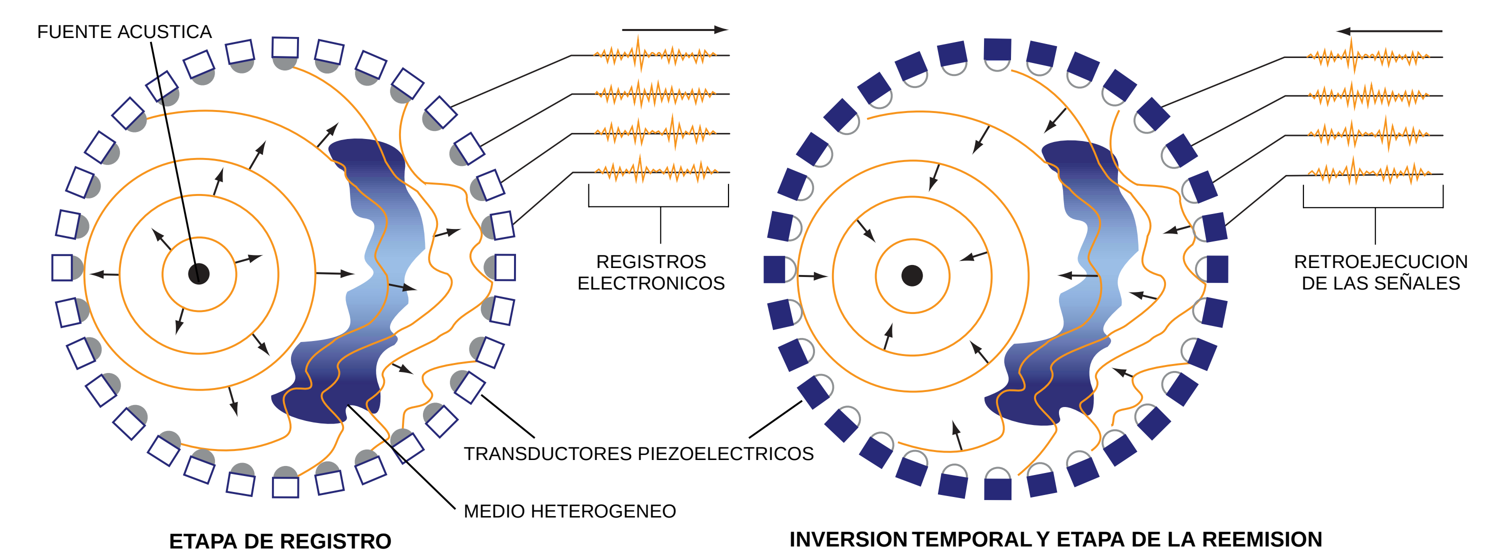
Baterías de transductores recrean un sonido y lo devuelven a su fuente, como si el tiempo se hubiese invertido. Sirve ello para deshacer cálculos renales, detectar defectos en los materiales y comunicarse con submarinos

Mathias Fink

En una sala del laboratorio de acústica y ondas de la Universidad Denis Diderot de París hay una batería de micrófonos y altavoces que devolverá a quien hable ante ella lo que haya dicho, pero al revés. Casi al instante un "hola" de saludo lo retornará en "alo". Al principio, suena a cinta rebobinada, aunque con una diferencia: el sonido se proyecta exactamente hacia la fuente. En vez de difundirse por toda la habitación desde los altavoces, el sonido del "alo" converge en la boca del locutor, como si el tiempo se hubiese invertido. Por esa razón llamamos al proceso "acústica de tiempo invertido"; de la batería ante la que uno se sitúa se dice que actúa como un "espejo de inversión temporal".

Estos espejos no son una novedad más. Presentan numerosas aplicaciones, de la destrucción de tumores y cálculos renales a la detección de defectos en los metales y a las comunicaciones a larga distancia, sin olvidar el descubrimiento de minas en el océano. Con ellos se hacen también elegantes experimentos de física pura.

La magia de la acústica de tiempo invertido brota de la propia naturaleza ondulatoria del sonido. Al hablar, se producen vibraciones en el aire que viajan a la manera de las ondas que se expanden en un estanque desde el punto donde cayó la piedra. Cuando dos ondas pasan por un mismo lugar se refuerzan si sus crestas y valles coinciden y se anulan si las crestas de una se combinan



1. UN ESPEJO DE INVERSION TEMPORAL actúa en dos pasos o etapas. En el primero (*izquierda*) una fuente emite ondas sonoras (*naranja*) que se propagan hacia fuera, distorsionadas quizá por las irregularidades del medio. Cada transductor de la batería del espejo detecta el sonido que le llega y expide la señal a un ordenador. En el segundo paso o etapa (*derecha*) cada transductor ejecuta al revés su señal sonora en sincronía con los demás transductores. Se recrea la onda original, que revierte por el mismo camino recorrido antes a través del medio, deshaciendo sus distorsiones y reenfocándose en el punto donde se encuentra la fuente original.

con los valles de la otra. Esta propiedad fundamental se cumple siempre doquiera se propague el sonido. Los ecos se reflejan en las paredes y demás obstáculos y mezclan diferentes partes de la misma onda. Los arquitectos de las salas de concierto deben prestar mucha atención a estos factores si quieren que se perciba un sonido de gran calidad en el aforo.

La otra propiedad esencial que hace posible la acústica de tiempo invertido es la inmutación. Es decir, si el tiempo retrocede, los procesos físicos que engendran las ondas quedan inmutados. Si se toma una película de unas ondas y se retroproyecta, las ondas que se verán seguirán obedeciendo las ecuaciones correctas. Esto vale también para la mecánica de partículas ordinaria, que rige sobre las bolas de billar y objetos de ese estilo; ahora bien, salvo en casos simples no es posible en la práctica "invertir temporalmente" la mecánica de partículas. El problema está en el fenómeno del caos. Un ligero cambio en la posición inicial de la partícula puede acabar en una modificación importante en su posición final.

Pensemos, por ejemplo, en esos juegos de bolas en tablero inclinado con numerosos obstáculos. Supongámosle una batería fija de cien. Lancemos la bola contra ese centenar de obstáculos dispuestos al azar. Ni siquiera con una simulación por ordenador se podría retrotraer la bola de forma que volviese a recorrer al revés su camino: tras una docena, más o menos, de colisiones la bola no daría en un obstáculo contra el que debería haber chocado (o viceversa), y a partir de ahí su camino sería completamente diferente. En una simulación basta con unos errores minúsculos debidos a los redondeos y el número limitado de decimales (los errores que se producen al almacenar números y efectuar operaciones aritméticas los ordenadores) para que la inversión temporal se descabale. Y en un experimento en la vida real sería imposible poner de vuelta la bola *exactamente* por la trayectoria invertida, lo que de nuevo alteraría de plano el resultado final.

Por contra, la propagación de las ondas es lineal. Ello significa que un ligero cambio en la onda inicial produce sólo un cambio ligero en la onda final. Igualmente, la reproducción marcha atrás de la onda "final", aun con las pequeñas imprecisiones inevitables, dará una onda que en su propagación acabará por recrear la "inicial", sólo que retromoviéndose y con imperfecciones de no mucha monta.

MATHIAS FINK desarrolló los espejos de inversión temporal en la Escuela Superior de Física y Química Industrial de la ciudad de París. Comparte la dirección del laboratorio de ondas y acústica con la enseñanza de la física en la Universidad Denis Diderot.

Espejos de inversión temporal

Así es como el espejo acústico de inversión temporal consigue reexpedir "alo" hacia la boca del visitante del laboratorio de París. La onda final es el sonido del "hola" que llega a la batería de micrófonos, tras viajar al exterior desde la boca del visitante. Cada micrófono detecta la onda acústica (es decir, el sonido) que llega al punto donde se encuentra y va pasando sobre la marcha la señal a un ordenador que almacena los datos. Cuando se extingue el último sonido del "hola", el ordenador invierte la señal de cada micrófono y la retroejecuta por medio del altavoz correspondiente, en exacta sincronización con las demás señales invertidas. De la batería de altavoces sale una aproximación muy cercana a la onda final, que ahora viaja marcha atrás y se propaga a través de la habitación recorriendo el mismo camino del "hola" original, ahora de vuelta a la boca del locutor.

Cada par de micrófono y altavoz puede combinarse en un transductor piezoeléctrico. Cuando pasa la onda, este aparato convierte el sonido en un voltaje; cuando se le aplica una diferencia de potencial, vibra como un altavoz

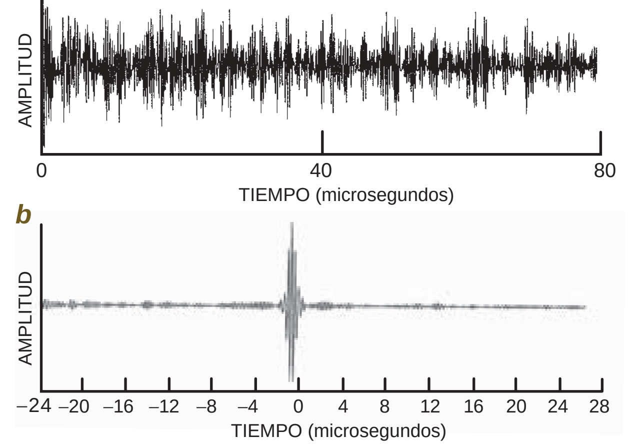
y produce sonido (*véase la figura 1*).

Para que funcione la acústica de inversión temporal, el sonido ha de propagarse sin perder demasiada energía en forma de calor, que es un movimiento al azar de las distintas moléculas de aire, y no, como en la onda sonora, un movimiento colectivo. Este requisito es análogo a cierta exigencia propia de un experimento de mecánica de partículas, la de que haya poca fricción. En una mesa de billar, por ejemplo, no es factible la inversión de las trayectorias porque resulta imposible acelerar las bolas de manera que se reproduzca correctamente, invertido en el tiempo, el enlentecimiento de las mismas causado por el rozamiento y la resistencia del aire.

Cuando esas pérdidas de energía son muy pequeñas, las ecuaciones a las que se atienen las ondas garantizan que, para cada pulso sonoro que diverja de una fuente, haya en teoría un conjunto de ondas que recorrerá con precisión, ahora de vuelta a la fuente, el camino original del sonido. Esto sigue siendo cierto aun cuando se complique el medio donde se efectúa la propagación con objetos y variaciones de densidad que reflejen, dispersen y refracten el sonido. Las ondas invertidas seguirían esos intrincados caminos y convergerían, sincrónicas, en la fuente original, como si el tiempo retrocediera. Mi grupo de investigación construyó y ensayó en 1988 un espejo acústico de inversión temporal con ondas ultrasónicas en medios ligeramente heterogéneos similares a los tejidos biológicos.

Podría pensarse que la batería de transductores no ha de tener ni un hueco, para que así la onda invertida se recree sin lagunas. Pero la manera en que las ondas se difractan hace que su propagación rellene vanos de hasta la mitad de la longitud de onda. Los transductores, pues, pueden estar espaciados hasta un medio de la menor longitud de onda sin que ello deteriore la calidad de la reproducción. Sin embargo, por la misma razón las ondas se reenfocarán en una zona no menor que la mitad de la menor longitud de onda. Todos los detalles de la fuente que sean menores que eso se perderán.

En la situación ideal, la batería de transductores cubriría todas las paredes y hasta el suelo y el techo de la sala, con lo que podría generarse la onda final entera. En la práctica suele ser imposible rodear por completo la fuente con transductores, y la inversión temporal se acostumbra realizar con un área de transductores limitada, a la que llamamos "espejo de inversión temporal" (EIT). Algo de información se pierde. Y cuanto menor sea la apertura del espejo, mayor será el tamaño de la zona focal. Es exactamente lo mismo que pasa en óptica, donde la resolución de un telescopio con un espejo grande podrá ser mayor que la de otro con un espejo pequeño. Hace unos veinte años que se lleva estudiando un análogo óptico de los EIT: los espejos de fase conjugada. Estos espejos exhiben retrorreflectancia: la luz se refleja de vuelta a la fuente, esté donde esté con respecto a la fuente. Pero tales espejos de fase conjugada no producen la inversión temporal de una señal luminosa variable.

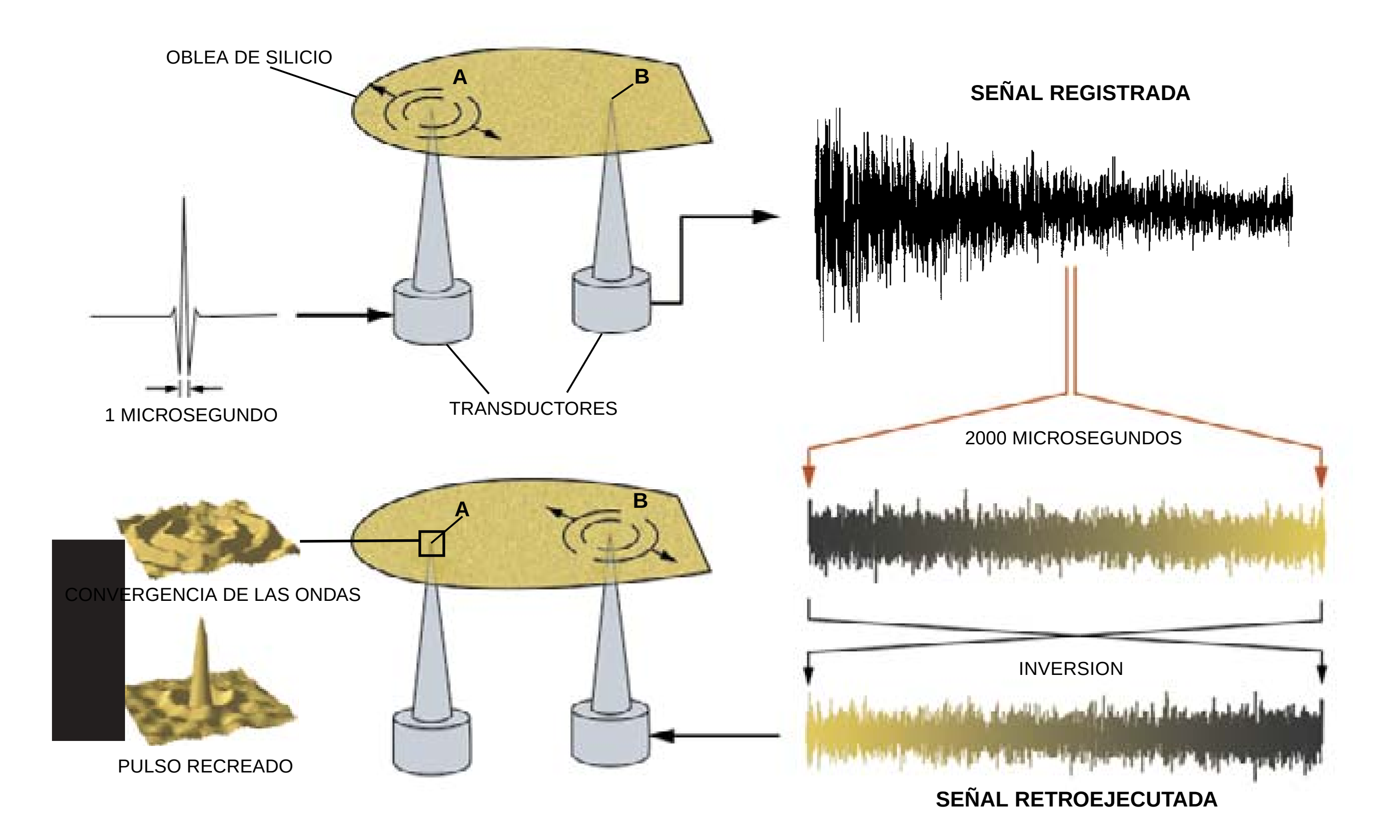


2. SE CREA UNA MAQUINA DE BOLAS acústica caótica cuando un pulso ultrasónico subacuático emitido por el transductor (*a la izquierda*) rebota entre 2000 varillas de acero, dispuestas al azar, antes de alcanzar un espejo de inversión temporal formado por 96 elementos, a la derecha. Cada elemento de esta batería recibe una señal sonora que parece caótica (en *a* se muestra parte de una), mucho más larga que el microsegundo del pulso original. Cuando el espejo devuelve las señales caóticas, invertidas y en sincronía, rebotan a través del laberinto de varillas, se recombinan y recrean un pulso bien definido (*b*) en el transductor.

Una máquina de bolas caótica

Arnaud Derode, Philippe Roux y yo efectuamos en 1994 una inversión temporal ultrasónica a través de un medio análogo a la mencionada máquina de bolas caótica. Obtuvimos unos resultados sorprendentes. Los obstáculos consistían en un conjunto aleatorio de 2000 varillas de acero paralelas e inmersas en un tanque de agua. De un pequeño transductor partía la onda, un pulso que duraba un microsegundo (1 µs) y se propagaba a través del "bosque" de varillas hasta una línea de 96 transductores piezoeléctricos. Con semejante disposición se detectaba un frente de ondas inicial, la parte del sonido que se había abierto paso directamente a través del bosque, seguido a continuación por una larga onda caótica que duraba 200 µs. La onda caótica correspondía a las porciones del pulso inicial dispersadas a lo largo de todos los caminos posibles entre las varillas.

En el segundo paso del experimento provocábamos la inversión temporal de esas señales; un hidrófono medía la onda que llegaba a la fuente. Aun cuando la batería reemitía a través del caótico bloque dispersor una señal de 200 µs, donde se encontraba la fuente se regeneraba un pulso de alrededor de 1 µs. Efectuamos las dos fases del experimento sin las varillas. Llamó la atención que el haz en inversión temporal se enfocase *con* las varillas en una zona seis veces menor que sin ellas. Paradoja que se deshace si caemos en la cuenta de que las múltiples reflexiones en el bosque redirigen hacia el espejo partes de la onda que, por sí mismas, no habrían ido a parar a la batería de transductores. Tras la operación de inversión temporal, el medio de dispersión múltiple actúa de lente focalizadora y hace que el espejo parezca tener una apertura seis veces mayor; mejora, pues, su resolución seis veces también.



3. UN SOLO TRANSDUCTOR puede provocar la inversión temporal de una onda en una "cavidad" cerrada. Un transductor fuente emite un pulso en el punto A, sobre una pequeña oblea de silicio (*arriba*); otro recoge en el punto B las reverberaciones caóticas del pulso reflejado en los bordes de la oblea cientos de veces. Este transductor en B ejecuta al revés un segmento breve de esa señal (*abajo*) que, tras muchas reflexiones, se recombina y recrea el breve pulso, de nuevo enfocado en A, como quedó de manifiesto al tomar imágenes de las ondas de la oblea cerca de A.

El experimento enseñó cuán estable resulta ser el proceso de inversión temporal. Las señales registradas se muestreaban con conversores de analógico a digital que introducían errores de cómputo. Además, si la batería y las varillas se movían una pequeña fracción de la longitud de onda (0,5 milímetros) una vez hecho ya el primer paso, seguía produciéndose de todas formas la inversión temporal, en contraste absoluto con lo que pasaría en un experimento de partículas. Cada partícula sigue una trayectoria definida; las ondas, en cambio, viajan por todas las trayectorias y visitan todos los objetos dispersores en todas las combinaciones posibles. Un pequeño error en la velocidad o la posición iniciales provocará que la partícula no dé en un obstáculo y, a partir de ahí, su trayectoria cambie por completo. Pero la amplitud de onda es mucho más estable porque resulta de la interferencia de todas las trayectorias posibles. En un entorno caótico, la física ondulatoria es mucho más robusta que la de partículas y las propiedades focalizadoras de los EIT mejoran.

Inversión temporal en una oblea de silicio

Con estas ideas de focalización y robustez en mente, nos preguntamos si no podría reducirse a uno el número de transductores que efectúan la inversión temporal. ¿Cómo se puede redirigir la información de una fuente hacia un solo transductor de inversión temporal? Decidimos probar a encerrar la fuente y el transductor dentro de unas paredes reflectoras, creando así una cavidad con una propiedad peculiar llamada ergodicidad. Una mesa de billar sin fricción y lados curvados como los de un estadio sería ergódica: en casi cualquier dirección que diese la bola acabaría por pasar por cada punto de la mesa. De manera similar, en una cavidad ergódica todos los rayos sonoros emitidos por una fuente terminarán por pasar por el transductor.

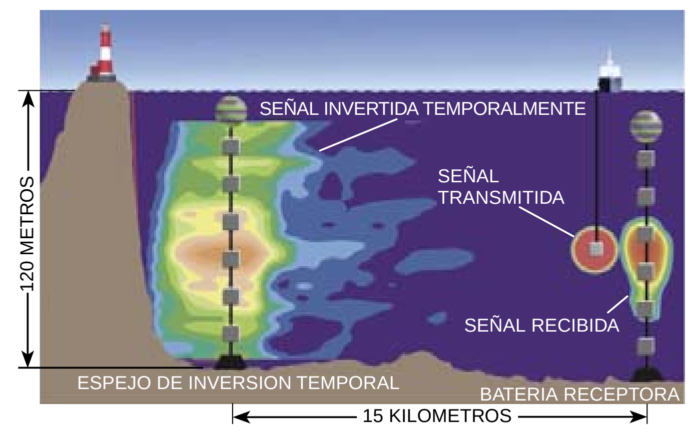
Hace tres años Carsten Draeger y yo efectuamos una inversión temporal con un solo transductor y ondas elásticas que se propagaban sobre la superficie de una oblea de silicio. El transductor fuente del punto A transmitía una onda superficial circular que duraba 1 μs. El transductor que hacía la inversión temporal en B registraba una señal caótica que se prolongaba más de 50 milisegundos (50.000 veces la duración inicial del pulso), correspondiente a unas cien reflexiones del pulso inicial en el borde de la oblea. Entonces se invertía temporalmente una parte de la señal que duraba dos milisegundos y el transductor la reemitía al punto B. Las ondas elásticas inducían pequeños desplazamientos verticales de la superficie del silicio, que observábamos examinándola alrededor del punto A con un interferómetro óptico.

En el punto A se producía una recreación del pulso original, muy impresionante, enfocada dentro de un radio de alrededor de la mitad de la longitud de onda y con una duración de un microsegundo. Valiéndose de las reflexiones en los bordes el campo de ondas invertido (en el tiempo) convergía hacia el punto de origen desde todas las direcciones y producía un lunar circular. El perfil de los dos milisegundos de la onda invertida temporalmente (correspondiente a casi 2000 complicadas oscilaciones) es el código necesario para enfocar exactamente en el punto A desde el B. Cabe imaginar una criptografía basada en este principio que usase señales procedentes del punto B para generar pulsos en diferentes puntos de la cavidad.

4. LAS COMUNICACIONES SUBACUATICAS y sus posibilidades de mejora mediante acústica de inversión temporal. Esta técnica de enfoque de señal se ensayó en aguas a 120 metros de profundidad cerca de la isla de Elba, frente a la costa italiana. Se envió un pulso sonoro desde el lugar del blanco y lo recogió, a 30 kilómetros de allí, una batería de transductores distorsionado por la refracción y múltiples reflexiones (*rojo*) en la superficie y el fondo. La señal invertida temporalmente que reemitió la batería se enfocó bien en el blanco.

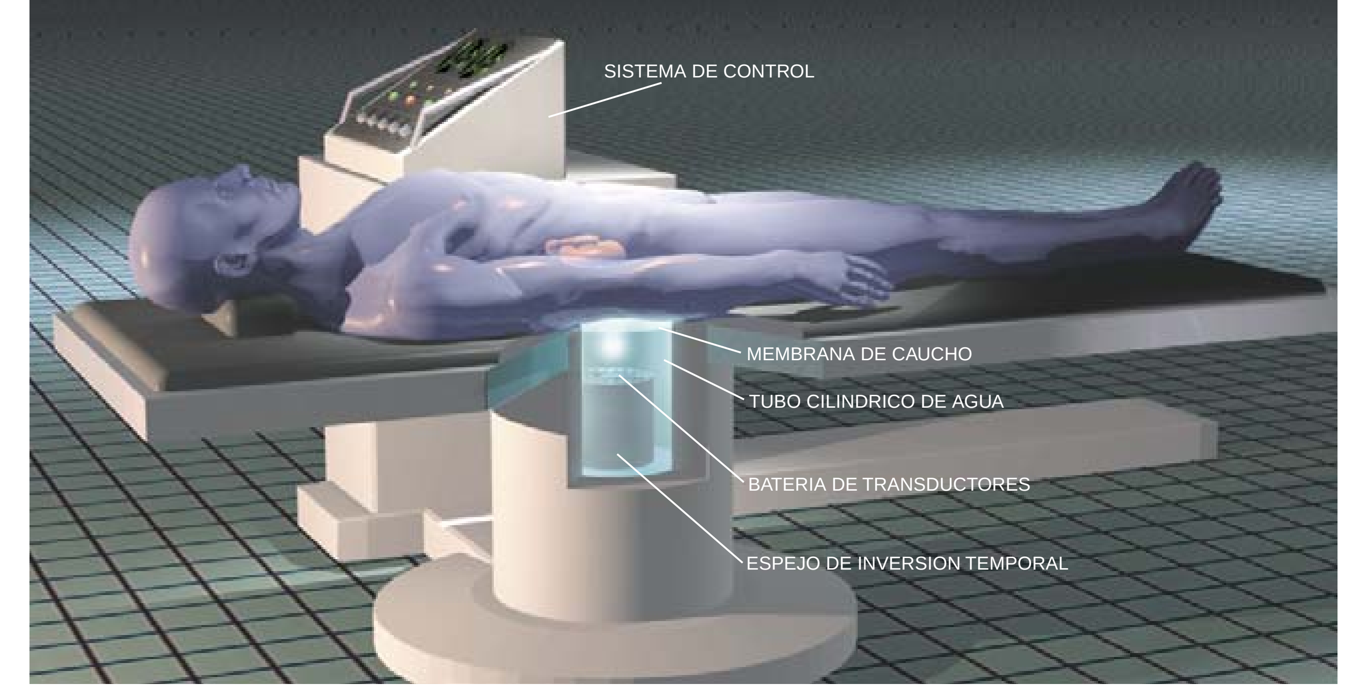
Los espejos de inversión temporal pueden compensar la propagación multirradial que es común en la acústica oceánica y limita la capacidad de los sistemas de comunicaciones submarinos. El problema se produce en aguas someras, donde el sonido viaja como en una guía de ondas, rebotando en el fondo marino y en la superficie del océano, con lo que un solo pulso transmitido genera múltiples copias de sí mismo en el receptor, de una manera que recuerda mucho a la cavidad ergódica. Los bordes de un canal marino no son ergódicos; por tanto, un espejo de inversión temporal debe contener un número considerable de transductores.

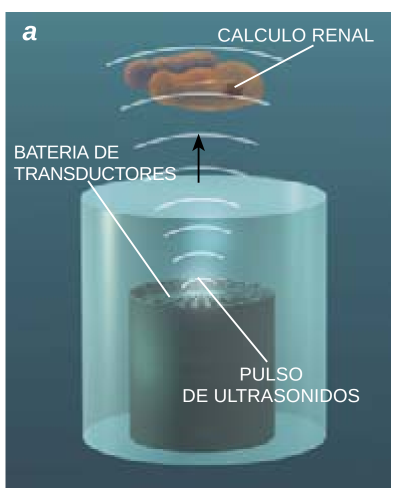
Hace poco, expertos de la Institución Scripps de Oceanografía de La Jolla y del Centro de Investigaciones Submarinas SACLANT, en La Spezia, construyeron y ensayaron un EIT de 20 elementos en el Mediterráneo, frente a la costa italiana. Dirigidos por Tuncay Akal, William Hodgkiss y William A. Kuperman, mostraron en aguas a unos 120 metros de profundidad que su espejo



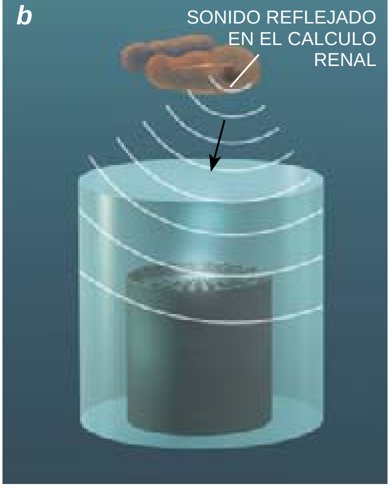
5. RESULTADOS de un ensayo subacuático. Los contornos de color indican la intensidad del sonido. La señal transmitida, un pulso (*círculo rojo*), llega muy distorsionada al espejo de inversión temporal, pero la señal invertida (*a la izquierda*) reproduce en la batería receptora un pulso enfocado (*a la derecha*).

podía enfocar las ondas sonoras hasta una distancia de 30 kilómetros. El haz invertido se enfocó en un lunar mucho menor que el observado con el sonar ordinario de formación de haces; es un resultado similar a la ampliación por seis en el experimento de las varillas dispersoras. Roux y yo hemos hecho estudios similares con guías de ondas ultrasónicas, en las que se dan reflexiones múltiples. Gracias a la focalización y la fuerte





PULSO ULTRASONICO



ECO DESDE EL CALCULO



ONDA EN INVERSION TEMPORAL

6. LOS CALCULOS RENALES, blanco apropiado de los ultrasonidos. Merced a la capacidad de autoenfoque generada por un espejo de inversión temporal, los ultrasonidos podrían deshacer las piedras. En efecto, un pulso ultrasónico emitido por una parte de la batería (*a*) produce un eco distorsionado procedente del cálculo (*b*). Una inversión temporal potenciada de este eco atraviesa los tejidos y órganos interpuestos y se enfoca de nuevo en la piedra (*c*) y la rompe. La iteración del proceso mejora el enfoque y permite seguir en tiempo real el movimiento del cálculo.

recompresión temporal de la onda invertida creamos un pulso acústico muy potente, susceptible de usarse para la generación de ondas de choque.

Un campo de aplicaciones de EIT muy fecundo es la detección con ecos de pulsos. Consiste en la emisión de un pulso corto y la detección de los ecos procedentes de uno o más blancos. Son múltiples las actividades en las que podría utilizarse, de la toma de imágenes en medicina a la evaluación no destructiva (la inspección de materiales, de componentes industriales, por ejemplo, por si tuviesen grietas y defectos) o a la acústica subacuática (búsqueda de minas, submarinos u objetos enterrados). El elemento común necesario para una detección de alta calidad es un haz acústico nítido; en cada aplicación, el medio interpuesto dificulta que el que llega al blanco lo sea. El problema adquiere especial interés en las técnicas de formación de imágenes con fines clínicos; se trata de lograr enviar el ultrasonido a través de la grasa, los huesos y los músculos hacia tumores o cálculos renales. La detección con ecos de pulsos por medio de un EIT puede solventar este problema.

Detección con ecos de pulsos

Una parte de la batería envía primero un pulso breve a través del medio distorsionador para iluminar la región de interés. A continuación se capta, invierte temporalmente y reemite la onda que un blanco ha reflejado hacia la batería. El proceso de inversión temporal garantiza que esa onda invertida se enfocará en el blanco, pese a todas las distorsiones del medio.

Cuando la región contiene sólo un blanco, esta técnica de autoenfoque es muy eficaz. Si hay varios, el problema se complica, pero se puede seleccionar una diana e iterar el proceso. Piénsese en el caso más sencillo, que el medio contenga dos blancos, uno más reflectante que el

otro. Los ecos producidos por el pulso inicial tendrán una componente algo más intensa cuando vengan del blanco más brillante que cuando retornen del más débil. Por tanto, la primera señal invertida temporalmente enfocará una onda en cada blanco, pero la del más brillante será más potente. Los ecos de estas nuevas ondas mostrarán un sesgo aún mayor hacia el blanco más brillante; tras unas cuantas iteraciones se tendrá una señal que se enfocará primariamente en él. Técnicas más complejas permiten seleccionar los reflectores más débiles.

Entre las aplicaciones médicas del espejo de inversión temporal de ecos de pulsos, la más inmediata será la destrucción de piedras en los riñones y vejigas urinarias. Las radiografías de rayos X o ultrasonidos localizan los cálculos, pero es difícil enfocar las ondas ultrasónicas a través de los tejidos circundantes para destruirlos. Además, cuesta seguir el movimiento de las piedras durante la respiración. Se calcula que sólo el 30 por ciento de los disparos llega a la piedra, y hacen falta varios miles para destruirla. Las técnicas de la inversión temporal ultrasónica pueden resolver estos problemas.

7. LA POROSIDAD DEL HUESO DEL CRANEO absorbe energía y dificulta el enfoque de las ondas ultrasónicas en un tumor cerebral para destruirlo. Un espejo de inversión temporal con un algoritmo de retroejecución modificado puede, sin embargo, enfocar los ultrasonidos, a través del hueso del cráneo, en un blanco pequeño.

Tras varias iteraciones del proceso de inversión temporal de los ecos de los pulsos, el haz ultrasónico se polariza en el área más reflectora del cálculo. Unos pulsos amplificados e intermitentes pueden aplicarse entonces a destrozarlo. Este proceso se repite para seguir el movimiento de la piedra en tiempo real. Jean-Louis Thomas, François Wu y yo hemos creado un EIT de 20 centímetros de diámetro para esta aplicación. Se han ensayado el procedimiento de seguimiento y la destrucción *in vitro* de piedras en dos hospitales franceses.

Otra aplicación prometedora es la hipertermia médica ultrasónica, en la que unos ultrasonidos de alta intensidad calientan los tejidos. Con temperaturas superiores a los 60 grados centígrados, los destruyen en segundos. Ya hay en el mercado dispositivos que utilizan las técnicas corrientes para enfocar los ultrasonidos, pero sólo sirven con tejidos estáticos, como una próstata cancerosa. Las aplicaciones abdominales y cardíacas se hallan condicionadas por los movimientos de la respiración y los latidos cardíacos. En la Universidad de Michigan, Emad Ebbini y su grupo están preparando unas baterías de autoenfoque para resolver este problema. Mi grupo trabaja en la hipertermia cerebral. La dificultad estriba en enfocar a través del cráneo, que refracta y dispersa intensamente el haz ultrasónico. La porosidad del cráneo produce una fuerte disipación —la absorción de la energía de la onda—, que rompe la simetría de la ecuación de ondas en la inversión temporal. Hemos desarrollado una nueva técnica de enfoque que añade a la inversión temporal ordinaria una corrección de los efectos disipativos. Gracias a la misma podemos mandar un haz ultrasónico a través del cráneo y enfocarlo en una zona de 1,5 milímetros de diámetro.

La técnica de los espejos de inversión temporal encontrará óptima aplicación en la detección inocua de defectos en los sólidos. Sin procedimientos destructivos resulta hoy difícil descubrir fallos pequeños en un objeto de geometría irregular o constituido por materiales heterogéneos o anisótropos. Por lo común, la muestra y los transductores ultrasónicos están inmersos en el agua, pero la refracción puede alterar los haces en la interfaz agua-sólido, razón por la cual cuesta aún más detectar pequeños defectos. Además, el ultrasonido puede producir una gama amplia de tipos y polarizaciones de ondas en el sólido. Pues bien, nosotros hemos demostrado que las técnicas de autoenfoque por medio de los EIT pueden compensar automáticamente esos problemas. En un programa conjunto con la Sociedad Nacional Francesa para el Estudio y la Construcción de Motores de Aviación hemos elaborado un EIT de 128 elementos que detecta defectos con poco contraste en las aleaciones de titanio que se usan en los motores a reacción. El titanio tiene una microestructura muy heterogénea, que produce mucho ruido de dispersión y puede enmascarar el eco de un defecto. Hemos mostrado que el método iterativo de ecos de pulsos detecta defectos de sólo 0,4 milímetros en una barra de titanio de 25 centímetros de diámetro y ofrece una razón entre señal y ruido mejor que las otras técnicas.

El proceso de la inversión temporal acústica, una rutina ya de laboratorio, debe prestar más atención a su inserción en entornos clínicos e industriales. Invertir un "hola" puede parecer un truco de la física. Lo importante es que los mismos principios en cuya virtud retorna en "alo" al emisor pueden aprovecharse, con un poco más de procesamiento por ordenador, para generar hologramas acústicos en la habitación.

Las técnicas de la inversión temporal podrían también extenderse a tipos de ondas distintas de las acústicas. Los expertos en radares exploran su posible aplicación al radar de pulsos, que utiliza ondas electromagnéticas de la región de las microondas. En la mecánica cuántica hay otro tipo de onda, las funciones de onda cuánticas que describen toda materia. Y realmente se produce otra modalidad de retrorreflexión cuando la función de onda de un electrón alcanza la frontera entre un conductor normal y un superconductor. Sólo cabe hacer cábalas acerca de qué trucos serían posibles si la inversión temporal se aplicase a las ondas de la mecánica cuántica.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

TIME-REVERSED ACOUSTICS. M. Fink, en *Physics Today*, vol. 50, n.º 3, págs. 34-40; marzo de 1997.

PHASE CONJUGATION IN THE OCEAN: EXPERIMENTAL DEMONSTRATION OF AN ACOUSTIC TIME-REVERSAL MIRROR. W. A. Kuperman, W. Hodgkiss, H. C. Song, T. Akal, C. Ferla y D. R. Jackson en *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 102, n.º 6, págs. 1-16, diciembre de 1997.

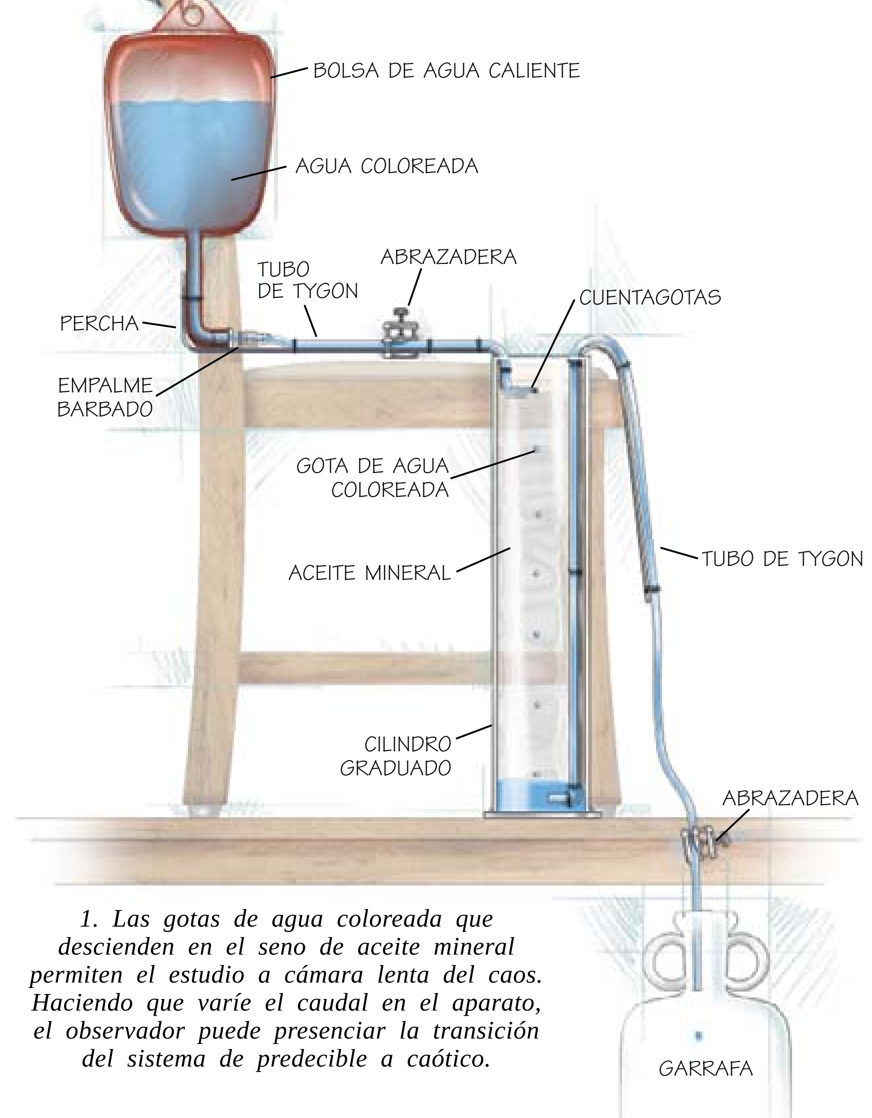
ULTRASOUND PUTS MATERIALS TO THE TEST. M. Fink, en *Physics World*, vol. 11, n.º 2, págs. 41-45, febrero de 1998.

Shawn Carlson

Caer en el caos

En mis años de alumno de física, pasé casi todo el tiempo estudiando poleas sin rozamiento, resortes sin masa, campos gravitatorios uniformes y mil cosas más inexistentes. Los científicos han admitido que durante algún tiempo los sistemas reales interactúan con sus entornos en formas esquivas para una medición rigurosa y que, con el paso del reloj, esos efectos se acumulan. Así que sabemos que las soluciones ideales pueden describir los sistemas sólo hasta ese punto. Lo que no hemos captado es precisamente cuán breve puede que sea ese período de tiempo.

En los años ochenta se descubrió que para numerosos sistemas reales las incontables complicaciones no complacientes de la naturaleza provocan que las observaciones dejen de concordar rapidísimamente con las predicciones. Podemos, por ejemplo, hacer todas las lecturas de temperatura, presión y velocidad del viento que queramos, pero desde luego careceremos de información suficiente para predecir el tiempo meteorológico hasta más allá de siete días. La causa es que los efectos de minúsculas perturbaciones, el reactor que vuela sobre nuestra ciudad, pueden acumularse mucho antes de que los científicos se hayan dado cuenta y alteren el tiempo de modos imprevistos. Los sistemas que caen presto en la impredecibilidad reciben el nombre de "caóticos".



1. Las gotas de agua coloreada que descienden en el seno de aceite mineral permiten el estudio a cámara lenta del caos. Haciendo que varíe el caudal en el aparato, el observador puede presenciar la transición del sistema de predecible a caótico.

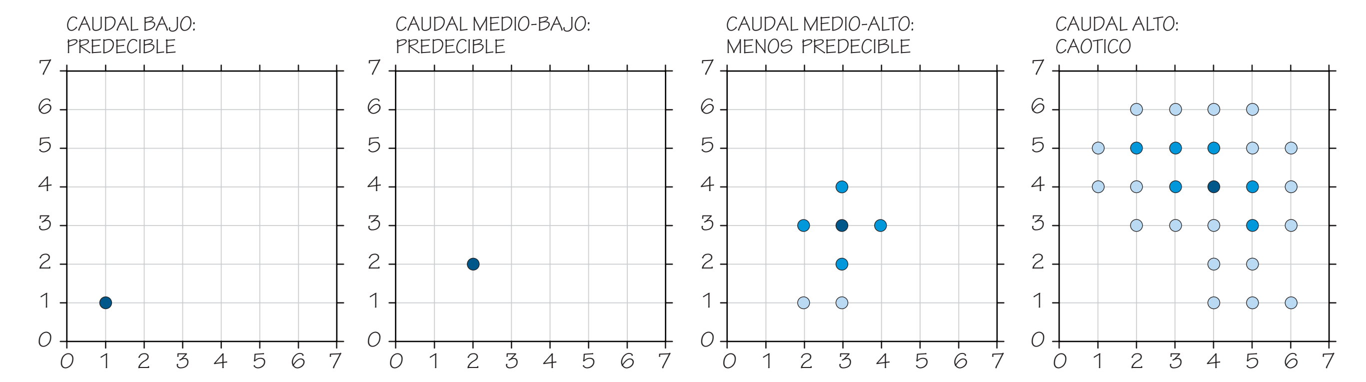
Ahora, merced a un delicioso dispositivo desarrollado por Mahlon Kriebel, profesor de neurología y psicología en una universidad neoyorquina, podemos explorar las sutilezas del caos sobre la mesa de nuestra cocina. El aparato de Kriebel es una versión a cámara lenta de otro clásico del caos: el grifo que gotea. Dejando caer gotas de agua coloreada en el seno de aceite mineral, Kriebel refrena la caída y estudia sin dificultad el desencadenamiento del caos.

Un cilindro graduado de 1000 centímetros cúbicos puede constituir un recipiente ideal para contener el aceite mineral, pero podría también servirnos un florero de tallo alto. Como depósito para el agua coloreada podemos valernos de una bolsa de agua caliente con su tubo accesorio. Este lo cortaremos y lo acoplaremos con un empalme de manguera barbado a un tubo de tygon. Necesitaremos una abrazadera de manguera para controlar el caudal que pasa por los tubos y la boquilla. En la ferretería encontraremos el empalme, las abrazaderas y los tubos. Para mantener la bolsa de agua muy por encima de la boquilla, sujeté aquélla al respaldo de una silla, que puse encima de la mesa de mi cocina.

Kriebel emplea por boquilla la punta de una pipeta, pero es más fácil hacerse con un cuentagotas. En el mío la abertura era demasiado ancha, por lo que rellené la punta con cera de bujía y luego abrí un pequeño orificio en la cera con una aguja de coser caliente. Con unos alicates manténgase la punta de la aguja contra la cera y póngase un soldador caliente en contacto con la aguja en las proximidades del cuentagotas. Si se aplica una presión firme y constante la aguja perforará el tapón de cera. Hecho esto, se inserta la boquilla en el tubo de tygon y se asegura la unión con una buena dosis de pegamento de acuario.

Para inmovilizar los tubos una vez situados, se sujetan a un trozo de alambre de percha. En esa tarea usaremos hilo de coser y no cordel, ya que éste desprende fibras que contaminan el aceite. Luego se instala el conjunto en el cilindro con el orificio de salida de la boquilla a unos diez centímetros por debajo de la boca del cilindro.

Atese un segundo trozo de tubo de tygon a otro alambre de percha



2. En los mapas de situación se representa una serie de números en función de su secuencia. En el primer punto, la ordenada ***x*** *es el primer número de la serie y la abscisa* ***y*** *el segundo. En el punto siguiente, la ordenada* ***x*** *es el segundo número y la* ***y*** *es el tercer número; así sucesivamente. De izquierda a derecha, los gráficos corresponden a caudales crecientes en el experimento (los puntos más oscuros indican un número mayor de casos del evento). Conforme se aumenta el caudal, el sistema se va haciendo menos predecible. Para el caudal máximo, representado en el gráfico del extremo izquierdo, el sistema se ha convertido en caótico.*

y colóquese un extremo en el fondo del cilindro. El otro extremo se pinza con una abrazadera y se introduce en una garrafa de vino vacía. Este montaje nos permite sifonar parte del agua coloreada que se acumula en el fondo y periódicamente retornarla a la bolsa.

Se llena de aceite mineral el cilindro hasta que el líquido justo cubra la boquilla. A continuación se tiñe un poco de agua con colorante culinario y esta solución se vierte en la bolsa de agua caliente. Aflojamos un poco la abrazadera superior, sólo lo suficiente para que en la boquilla se formen gotas lentamente y caigan atravesando el aceite mineral. Ya estamos preparados para nuestro viaje al caos.

Los caudales más bajos producen gotas más o menos del mismo tamaño, por lo que caen a un ritmo casi constante; llegan al fondo una tras otra, según un patrón que puede consignarse como 1, 1, 1, 1,...

Para un caudal algo mayor, el tamaño de las gotas fluctúa. Las mayores viajan por el aceite más rápidas que las pequeñas (las primeras poseen una velocidad terminal mayor pues es mayor su masa por unidad de superficie); en razón de ello alcanzan y empujan a las pequeñas, cayendo en grupos de dos. Para este caudal, el patrón es 2, 2, 2, 2,... Aumentando el caudal un poco más, crearemos un patrón de caída en tríos.

¿Qué ocurre si potenciamos el caudal? La cosa se desorganiza, con unos resultados no predecibles, aunque tampoco aleatorios. Para entender por qué, consideremos la rodadura de los dados, similar a la caída de gotas en que ambas dependen de factores inmanejables. Basta una ligera modificación de la velocidad de rotación o de la trayectoria de un dado en el momento en que abandona nuestra mano, para alterar completamente la forma en que rodará. Análogamente, el tamaño de una gota y su velocidad de descenso dependen de variables incontrolables tales como su vibración cuando se separa del chorro y las presiones fluctuantes dentro de la boquilla.

Un proceso aleatorio auténtico, sin embargo, es *absolutamente* impredecible; cualquier cosa que observemos en un instante no tiene relación alguna con lo que pasó antes y ninguna con lo que venga después. En ese sentido, lanzar un dado es un fenómeno de azar, ya que la probabilidad de obtener un "1", por ejemplo, es siempre de un sexto, independientemente de los lanzamientos anteriores. Pero las gotas al caer se comportan de otro modo, pues aunque un estado quizá no determine el siguiente, sí puede afectarlo.

Si proseguimos lanzando un dado, al final conseguiremos dos unos seguidos. Mas para un caudal rápido nunca observé que cayeran dos gotas sueltas una tras otra. Concluí así que la creación de una gota suelta hacía siempre que el sistema entrara en un estado que producía sólo gotas múltiples. En otras palabras, la llegada de una gota suelta me garantizaba que seguiría un agrupamiento. Esto ya era al menos cierta información. Y aún sabía menos de lo que venía después. El hecho de que cada estado afecte al siguiente y los resultados fueran rápidamente cada vez menos ciertos constituye la esencia del caos, ente que habita en el hueco que separa la perfecta predecibilidad del péndulo matemático y la pura aleatoriedad de un dado lanzado.

Para representar los sistemas caóticos se cuenta con la ayuda de un gráfico especial llamado mapa de situación numérica. Sean los datos referentes a las gotas de agua; el primer punto se representa tomando el primer número de la serie como la ordenada *x* y el segundo número como la abscisa *y*. Para el segundo punto, se emplea el segundo dato de la serie como *x* y el tercero como *y*. Seguimos así hasta agotar los datos. Para el goteo uniforme del grifo a bajo caudal, todos los puntos se agolpan en torno a una única posición. Si los datos son aleatorios, todas las parejas son equiprobables, y los puntos se distribuirán sobre el mapa. Por otra parte, un sistema caótico no es aleatorio, ya que cada evento afecta al siguiente y, por tanto, algunas combinaciones son más probables que otras. En una vinculación estrecha, habrá zonas del mapa sin ningún punto.

Los mapas de situación revelan un universo lleno de caóticos deleites. Ciertamente, innumerables fenómenos cotidianos son caóticos, tales como el intervalo entre dos peatones que pasan por una calle concurrida, la distancia entre las flores de una trepadora y las separaciones entre las rayas de un gato. Represéntense esas variables para descubrir hasta qué punto es caótico nuestro mundo.

Una buena introducción a la teoría del caos es Orden y Caos, *publicado por Prensa Científica. Más información sobre este y otros proyectos puede encontrarse en el sitio Web de la Society for Amateur Scientists en earth.thesphere.com/sas/WabX. cgi. La dirección es 4735 Clairemont Square, PMB 179, San Diego, CA 92117.*

JUEGOS MATEMÁTICOS

Ian Stewart

Cuadrados mágicos maxiperfectos

Los cuadrados mágicos dan mucho juego. Tomemos, por ejemplo, los números enteros consecutivos desde 1 a 16, y dispongámoslos en una tabla de 4 por 4, de manera que todas las filas, todas las columnas y las dos diagonales tengan siempre la misma suma. Si acertamos, habremos construido un cuadrado mágico de orden 4; la suma común recibe el nombre de constante mágica. Si logramos otro tanto con los números de 1 a 25, dispuestos ahora en una tabla de 5 por 5, tendremos un cuadrado mágico de orden 5, y así sucesivamente.

Cada vez resulta mucho más difícil aportar algo nuevo a los aspectos básicos. Y eso es precisamente lo que hicieron en 1998 Kathleen Ollerenshaw y David S. Brée en un libro maravilloso de título un tanto amedrentador: *Cuadrados mágicos pandiagonales maxiperfectos: construcción y enumeración.*

El libro expone la primera solución parcial importante de uno de los problemas pendientes: la determinación del número de cuadrados mágicos que existen para cada orden dado. El resultado principal es una fórmula para el número de los cuadrados maxiperfectos, subconjunto de cuadrados mágicos que goza de propiedades especiales. Por si pudiera parecer que se trata de un problema sencillo, baste decir que el número de tales cuadrados de orden 12 supera los 22 millardos. El número correspondiente al orden 36 es, aproximadamente, $2{,}7 \times 10^{44}$.

Abordaron el problema aplicando métodos de combinatoria, arte del recuento indirecto; por tanto, sin la previa formación de la lista completa de los objetos que se han de contar.

Para propósitos matemáticos, resulta conveniente construir los cuadrados mágicos de orden n mediante los enteros $0, 1, 2, ..., n^2 - 1$. Los cuadrados mágicos tradicionales, sin embargo, no contienen el 0; se utilizan los enteros $1, 2, 3, ..., n^2$. No hay diferencia esencial entre uno y otro convenios: sumando 1 a cada elemento de la tabla de un cuadrado mágico matemático se obtiene un cuadrado tradicional, y recíprocamente, al restar 1 de cada casilla de un cuadrado mágico tradicional se obtiene un cuadrado matemático. Sólo cambia la constante mágica del cuadrado mágico, que resulta incrementada o decrementada en n.

Existe un solo cuadrado mágico de orden 1, a saber, el número 0 por sí solo. No hay cuadrados mágicos de orden 2 (único orden en que no se pueden dar), porque las condiciones obligan a que sean iguales los números de las cuatro casillas. Existen ocho cuadrados mágicos de orden 3, pero todos se deducen por giro o simetría de un solo cuadrado de constante mágica de 12:

1	8	3
6	4	2
5	0	7

Los cuadrados obtenidos por giro o simetría de un cuadrado mágico son mágicos también. Por eso, todos los cuadrados mágicos de orden 3 son sustancialmente uno mismo. Existen, sin embargo muchísimos cuadrados mágicos de orden 4, y su número se dispara explosivamente al crecer el orden. No se conoce una fórmula exacta para calcular tal número.

Para avanzar en esa dirección se imponen condiciones adicionales a los cuadrados mágicos. En nuestro caso, la más natural de tales condiciones es que el cuadrado sea pandiagonal; a saber, que la suma de todas las "diagonales fragmentadas" haya de ser también la constante mágica. (Las diagonales fragmentadas salen por uno de los lados del cuadrado y entran por el lado opuesto.) Demos un ejemplo de cuadrado mágico pandiagonal cuya constante mágica sea 30:

64	92	81	94	48	77	67	63	50	61	83	78
31	99	14	97	47	114	28	128	45	130	12	113
24	132	41	134	8	117	27	103	10	101	43	118
23	107	6	105	39	122	20	136	37	138	4	121
16	140	33	142	0	125	19	111	2	109	35	126
75	55	58	53	91	70	72	84	89	86	56	69
76	80	93	82	60	65	79	51	62	49	95	66
115	15	98	13	131	30	112	44	129	46	96	29
116	40	133	42	100	25	119	11	102	9	135	26
123	7	106	5	139	22	120	36	137	38	104	21
124	32	141	34	108	17	127	3	110	1	143	18
71	59	54	57	87	74	68	88	85	90	52	73

Este cuadrado mágico de orden 12 es maxiperfecto porque los números de cualquier subcuadrado de 2×2 (recuadros negros) *tienen la misma suma: 286*

0	11	6	13
14	5	8	3
9	2	15	4
7	12	1	10

Aquí tenemos ejemplos de las diagonales fragmentadas en $11 + 8 + 4 + 7$ y en $11 + 14 + 4 + 1$; ambas suman 30. El cuadrado de orden 3 no es pandiagonal: por ejemplo, $8 + 2 + 5 = 15$, que no es la constante mágica 12. De hecho, un cuadrado mágico no puede ser pandiagonal a menos que su orden sea doblemente par, vale decir, múltiplo de 4.

Los cuadrados maxiperfectos han de cumplir condiciones aún más estrictas. Además de ser mágicos y pandiagonales, gozan también de la propiedad de que cualquier subcuadrado de tamaño 2×2 ha de sumar también un mismo total, a saber, $2n^2 - 2$, siendo n el orden del cuadrado mágico. (Puede demostrarse que el cuadrado mágico cuyos subcuadrados tengan todos esta propiedad es necesariamente pandiagonal.) El cuadrado de orden 4 dado arriba es maxiperfecto: por ejemplo, los números del subcuadrado de orden 2 constituido por 0, 11, 14 y 5 suman 30. Hay que señalar que deben contarse también los bloques de 2 por 2 que salen de un lado del cuadrado y entran por el otro, como el formado por 3, 4, 14 y 9. El cuadrado de orden 12 de la página precedente, mucho más ambicioso, también es maxiperfecto.

La clave del método de recuento de Ollerenshaw y Brée reside en un vínculo existente entre los cuadrados maxiperfectos y los "cuadrados reversibles". Se dice que una sucesión de enteros tiene semejanza reversible si al escribir la sucesión en orden inverso y sumar los números que ocupan en una y otra las mismas posiciones, las sumas son iguales. Por ejemplo, la secuencia 1, 4, 2, 7, 5, 8 tiene semejanza reversible, porque al invertir su orden se obtiene 8, 5, 7, 2, 4, 1, y la suma de los números correspondientes, a saber, $1 + 8$, $4 + 5$, $2 + 7$, $7 + 2$, $5 + 4$ y $8 + 1$, es en todos los casos igual a 9.

Por cuadrado reversible de orden n se entiende una tabla cuadrada de tamaño $n \times n$ formada por los números enteros 0, 1, 2, ..., $n^2 - 1$, que tiene las siguientes propiedades: cada fila y cada columna poseen semejanza inversa, y las sumas de los números situados en los vértices opuestos de todo rectángulo de números inscrito en el cuadrado son iguales. Por ejemplo, la tabla 4×4 de los enteros de 0 a 15 en orden creciente es reversible. En la tercera fila, $8 + 11 = 9 + 10 = 19$. Lo mismo ocurre con todas las demás filas y columnas. Además, igualdades como $5 + 11 = 7 + 9$ y $1 + 15 = 3 + 13$ hacen ver que se verifica la segunda condición:

0	1	2	3
4	5	6	7
8	9	10	11
12	13	14	15

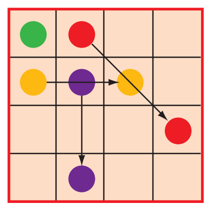
En general, los cuadrados reversibles no suelen ser mágicos, pero Ollerenshaw y Brée demuestran que cada cuadrado reversible de orden doblemente par puede ser transformado, mediante un procedimiento específico, en un cuadrado mágico maxiperfecto; y prueban que todo cuadrado mágico maxiperfecto puede obtenerse así. Mostraremos el procedimiento sobre el cuadrado reversible de orden 4 anterior. Primero invertimos la mitad derecha de cada fila:

0	1	3	2
4	5	7	6
8	9	11	10
12	13	15	14

Se invierte después la mitad inferior de cada columna

0	1	3	2
4	5	7	6
12	13	15	14
8	9	11	10

Ahora descomponemos el cuadrado en bloques de 2×2. Se desplazan los cuatro números de cada bloque como se indica a continuación:



El elemento del ángulo superior izquierdo permanece fijo, el superior derecho se desplaza en diagonal dos cuadros, el inferior izquierdo va dos espacios hacia la derecha y el inferior derecho, dos espacios hacia abajo. Si algún número cae fuera de los límites del cuadrado 4×4, se entra por el lado opuesto al de salida para llevarlo a su lugar pertinente. (Este método funciona sólo para cuadrados de orden 4. En el caso general de orden n existe un procedimiento similar.) El resultado es, en este caso, un cuadrado mágico maxiperfecto:

0	14	3	13
7	9	4	10
12	2	15	1
11	5	8	6

El procedimiento de transformación define una correspondencia biunívoca entre los cuadrados mágicos maxiperfectos y los cuadrados reversibles de orden doblemente par. Podemos, pues, contar el número de cuadrados mágicos maxiperfectos averiguando el número de cuadrados reversibles del mismo orden. No parece que este cambio en la naturaleza del problema lleve muy lejos, pero resulta que los cuadrados reversibles poseen varias propiedades gratas que sí hacen posible su recuento.

Los cuadrados reversibles pueden agruparse en clases. Todos los miembros de una misma clase están relacionados entre sí por giros, simetrías y algunas otras maniobras un poco más complicadas. Para construir todos los miembros de una tal clase, basta construir uno y aplicar después las transformaciones. Además, cada clase contiene un "cuadrado principal" y sólo uno. Finalmente, todas las clases son del mismo tamaño. El número de cuadrados esencialmente diferentes de cada clase es $2^{n-2}((n/2)!)^2$, donde el signo de exclamación indica una factorial. (Por ejemplo, $6! = 6 \times 5 \times 4 \times 3 \times 2 \times 1 = 720$.)

Sólo falta, pues, contar cuántos cuadrados principales reversibles existen de un orden dado y multiplicar ese número por la fórmula recién dada. El resultado será el número de cuadrados mágicos maxiperfectos esencialmente diferentes de ese mismo orden. A su vez, puede calcularse el número de cuadrados reversibles principales mediante una fórmula. Sólo diré que para los órdenes doblemente pares $n = 4$, 8, 12 y 16, los números de cuadrados mágicos maxiperfectos son, respectivamente, 48, 368, 640, $2{,}22953 \times 10^{10}$ y $9{,}322433 \times 10^{14}$.

NEXOS

James Burke

Sin correspondencia

Las matemáticas de Daniel Bernoulli, en cualquier idioma que hubieran aparecido, habrían sido una maravilla imponente.

Me encontraba en un pueblo espléndido del litoral italiano, Lerici, cerca de La Spezia. Desde la ventana del hotel Shelley contemplaba la bahía en la que el afamado poeta del mismo nombre se ahogó en 1822. Me vino a la memoria su endurecida esposa.

Al año del naufragio, Mary, pálida e interesante, pasó por París de regreso a Londres. Disfrutó de lo lindo al asistir a la representación teatral de una obra que había escrito tras inspirarse en las lecciones de química de Sir Humphrey Davy. Probablemente no fuera ese el destino soñado por Davy. La obra se llamaba *Frankenstein* y la reacción francesa fue entusiasta. La propia Mary tuvo un efecto similar en un novelista romántico local, amante con frecuencia no correspondido. Hablamos del parisiense Prosper Mérimée. (La lectura de apenas un par de páginas de su *Una crónica de la época de Carlos IX* es el mejor remedio contra el insomnio.) Ya hemos mencionado a Mérimée en otras ocasiones. La verdad es que resulta imposible cruzar el siglo XIX francés sin tropezar con él, siempre ávido por entrar en relación con gente famosa.

Lo era un viejo compañero de pupitre. Jean-Jacques Ampére, experto en mitología escandinava, filólogo e hijo de André-Marie, el electrizante genio que dio su nombre a un aspecto de la electricidad que no acabo de entender. Ampère padre llevó una vida aperreada: la Revolución guillotinó a su progenitor. Si su primera mujer murió joven, la segunda lo abandonó, y así no es de extrañar que su suegra se mofara de su estampa. André-Marie se encerró en su trabajo y terminó por asombrar a las lumbreras de Europa con la ciencia de la electrodinámica. Nos haremos una idea del tipo de hombre que era si mencionamos que, en su infancia, un librero de Lyon le dijo que el texto de matemáticas que quería estudiar ese día sólo existía en latín. Ni corto ni perezoso dio media vuelta y volvió a casa para ponerse a aprenderlo.

Insisto. Las matemáticas de Daniel Bernoulli, en cualquier idioma que hubieran aparecido, habrían sido una imponente maravilla. Hasta ocho matemáticos se dieron en tres generaciones de la familia Bernoulli, cada cual más críptico. Daniel explicó cosas de peso; así, por qué los alerones mantienen a los aviones en el aire (el principio de Bernoulli: el aire circula por encima de la ligera hoja curvada que es el ala a una velocidad mayor que por debajo de ella, de forma que la presión del aire de la parte superior disminuye y el avión se ve succionado hacia el cielo). Daniel trabajó también con esferas que rodaban por planos inclinados, con las matemáticas oscilatorias de los tubos de los órganos y, una brillante aportación de la técnica del siglo XVIII, con la forma óptima de los relojes de arena. Sentaba cátedra de física experimental en Basilea.

Entre sus alumnos atentos distinguimos la cara de Joseph Frederick Wallet Desbarres. Se trasladó éste luego a Inglaterra y en 1756 era nombrado jefe del Real Regimiento Británico de América. Tenía por misión reclutar colonos americanos (que lo harían mejor que las casacas rojas en su lucha contra los franceses de los bosques del Canadá) y también alguien para explorar el terreno. Encomendó esta última labor a Samuel Holland, antiguo ingeniero del ejército holandés y formidable triangulador. Desbarres y Holland (con algunos ayudantes) iniciaron el trabajo de exploración del lugar para preparar el ataque británico contra Québec. Su labor se concretó en las magníficas cartas del Neptuno Atlántico, que dotaron a la marina británica de la triangulación necesaria para dominar cada cala y toda ensenada de la (potencialmente revolucionaria) costa oriental norteamericana. Para cuando se trazó el último triángulo, por decirlo de alguna manera, y el trabajo estaba listo para su publicación, había empezado ya el año 1777. Demasiado tarde.

Antes, en 1759, Desbarres y Holland enseñaron cuanto sabían sobre la exploración (y su arte emparentada, la navegación) a un imberbe marino, quien volvió a casa y se transformó en alguien; capitaneó nada menos que el *Endeavour* en la expedición de 1768 a Tahití que estudió el paso de Venus. Luego, y a lo largo de tres expediciones por el Pacífico, James Cook, tal el nombre del aludido mozalbete, cartografió buena parte de Nueva Zelanda, descubrió Nueva Caledonia, las Islas Sandwich del Sur y Georgia del Sur. En Gran Bretaña, adquirió renombre suficiente en el campo de la exploración. Y mereció posar para Sir Nathaniel Dance-Holland, cuya (escasa) fama le viene de su hermano. George Dance-Holland fue un miembro menor de la nueva fraternidad neoclásica de los arquitectos, lo que implica que, en algún momento de los cincuenta de esa centuria dieciochesca, los dos hermanos realizarían el obligado viaje a Italia.



Allí visitarían las recién descubiertas Pompeya, Herculano y compañía.

Otra inexcusable visita local, de quien Nathaniel se enamoró sin remedio ni correspondencia (¡uno más!), era la pintora suiza Angelica Kauffman. En aquella época, los expatriados que se daban a la *dolce vita* en Roma (la señorita Kauffman incluida) se reunían en torno a un alegre prusiano. Genio del arte (inventó el estudio de la historia del arte), Johann Winckelmann era el oráculo a quien acudir (como hicieron Nathan y George) para saber qué ver y qué decir. Winckelmann escribió un sólido análisis sobre el arte y la arquitectura de la Grecia clásica. A él debemos la idea de que, para entender su creación artística, primero hay que conocer el momento histórico en que se desarrolla. Relativismo histórico, me parece que se llama. Buena cosa, si no fuera porque facilitó las reglas básicas para el vacuo parloteo pseudocultural tan habitual en radio y televisión.

Uno de los muchos admiradores de Winckelmann fue otro suizo, Henry Fuseli. Pintor de profesión que recaló en Londres y editó un libro del protestante helvético Johann Lavater. Esta influyente obra, titulada *Physiognomy*, suponía lo último en temas pseudocientíficos sobre la interpretación de los rasgos psicológicos a través de las características faciales. El mismo Fuseli debe de haber tenido una buena fisonomía, porque todas las mujeres caían rendidas a sus pies. Pero la única relación importante —no correspondida, no podía ser menos— fue Mary Wollstonecraft.

Probablemente una de las primeras auténticas feministas, escribió en 1792 un portentoso artículo sobre la emancipación titulado “Una reivindicación de los derechos de la mujer”. En 1796 tuvo una relación con, quedó embarazada de y desposó a (en este mismo orden) uno de los pensadores más liberales de la época: William Godwin. En 1793, cuando se publicó “Justicia política”, Godwin se hizo célebre de la noche a la mañana entre los librepensadores. Godwin abogaba por una suerte de comunismo, pero terminó cayendo en el ambientalismo, más que en el naturalismo, al considerar la educación como la clave para formar el carácter. Tendencia que se acentuaría con el advenimiento de ilustrados de la industrialización. Nómbrese aquí a Robert Owen, el primer propietario de molinos de Escocia en escolarizar a los hijos de sus trabajadores (su futura fuerza laboral).

William Godwin fue radical entre los radicales, hasta el punto de afirmar que las mujeres tenían capacidad de raciocinio, una aseveración tan escandalosa que bastó para engatusar a Mary. Para ir acabando esta colección de desgracias, recordemos que tampoco Godwin pudo ser correspondido, porque Mary Wollstonecraft Godwin murió de unas fiebres poco después de dar a luz a una niña (también Mary) que creció sin los cuidados y la protección de su madre. Tal vez por ello terminó fugándose con un poeta, que no daba una a derechas.

Que escribió buenos versos, pero que no supo navegar para salvar la vida.

Genética

Usos y abusos

GENETICS, por A.V.S.S. Sambamurty. Narosa; Nueva Delhi, 1999. **GENÉTICA**, por M. J. Puertas. McGraw-Hill; Madrid, 1999. **GENOMIC IMPRINTING. AN INTERDISCIPLINARY APPROACH**. Dirigido por Rolf Ohlsson. Springer; Berlín, 1999.

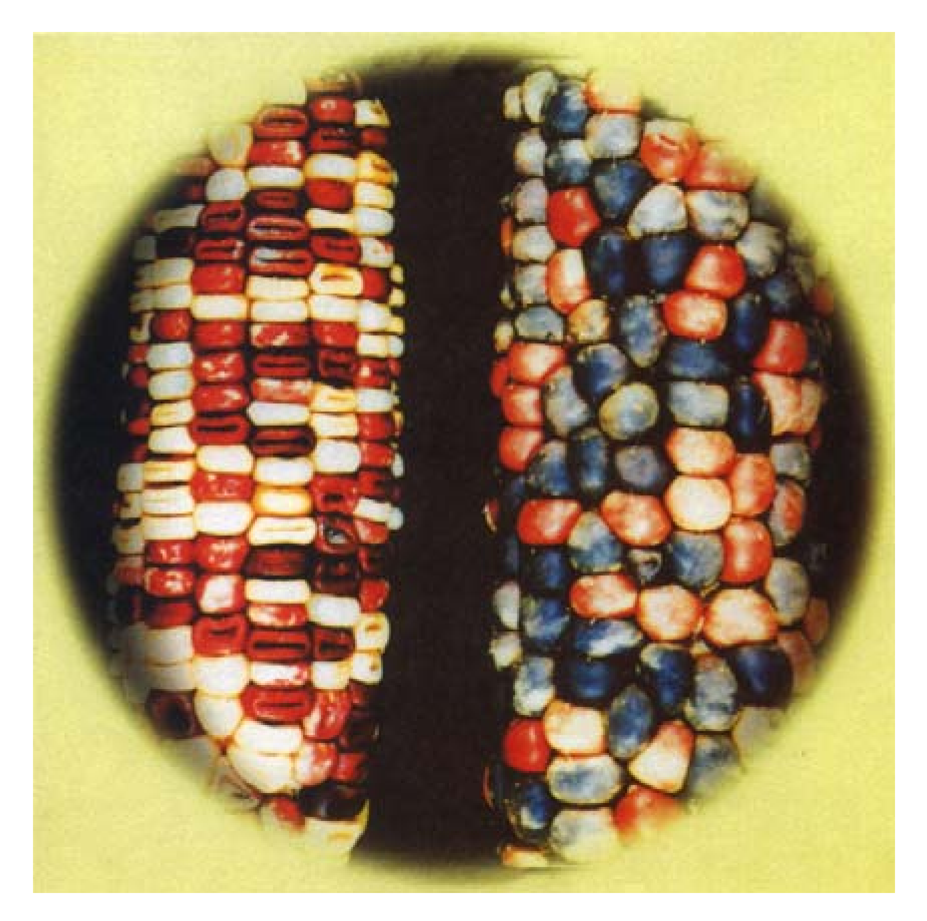
HUMAN GENE EVOLUTION, por David N. Cooper. Bios Scientific Publishers; Oxford, 1999. **GENE THERAPY. PRINCIPLES AND APPLICATIONS**. Dirigido por Thomas Blankenstein. Birkhäuser Verlag; Basilea, 1999. **THE DEVELOPMENT OF HUMAN GENE THERAPY**. Dirigido por Theodore Friedmann. Cold Spring Harbor Laboratory Press; Cold Spring Harbor, 1999.

HAECKEL'S MONISM AND THE BIRTH OF FASCIST IDEOLOGY, por Daniel Gasman. Peter Lang; Berna, 1998. **DIE GESCHICHTE DER GENETISCH ORIENTIERTEN HIRNFORSCHUNG VON CÉCILE UND OSKAR VOGT IN DER ZEIT von 1895 bis ca. 1927**, por Helga Satzinger. Deutscher Apotheker Verlag; Stuttgart, 1998.

Con cadencia rutinaria se va identificando gen tras gen. Pronto, se cartografiarán cromosomas enteros a un ritmo similar. Han abierto la marcha el cromosoma humano 22 y los cromosomas 2 y 4 de *Arabidopsis thaliana*. En el caso particular de la planta, lo secuenciado cubre un 30 por ciento de sus genes y corrobora la profunda homología que existe entre organismos muy dispares y alejados en el árbol filogenético. Las secuencias observadas revelan también el dinamismo de un genoma que conserva en su seno aciertos remotos con ensayos de adaptación reciente.

De la convergencia de esos avances con el desarrollo de un armamentario más biológico que técnico saldrá la revolución que se espera en terapia clínica. No cesa la lluvia de publicaciones sobre tal horizonte prometedor. Mas, empecemos por asentar conceptos. ¿En qué manuales? Por ejemplo: *Genetics*, de A.V.S.S. Sambamurty, y *Genética*, de M. J. Puertas. Comparten contenido, destinatarios e incluso pobreza de impresión. El texto indio se acomoda a un reparto clásico de la materia y desmenuza con ordenado rigor la genética mendeliana, genética molecular y citogenética, sin perder de vista su aplicación a la mejora vegetal y animal. Sistemático y gradual, explica términos, métodos o procesos emergentes en su contexto. Y al hilo de la exposición formula y resuelve los problemas. Diríase que piensa en el alumno que ha de multiplicar la potencia agroalimentaria de su país. La autora del manual español, que se propone incluir hasta el recodo más sutil del paisaje, parece tener puesta la mirada en futuros investigadores.

Para plastificar la distinta orientación —la igualdad de fondo se da por descontada—, sírvanos de muestra la descripción de una técnica básica de genética molecular, la transferencia de Southern ("Southern blotting"). Expone Sambamurty: "la electroforesis en gel aporta una herramienta poderosa para la separación de macromoléculas de diferente tamaño y carga distinta. Las macromoléculas pueden, luego, someterse a ulterior análisis. En 1975 E.M. Southern publicó un nuevo procedimiento que permitió identificar la ubicación de los genes y de otras secuencias de ADN en fragmentos de restricción, separados por electroforesis en gel. La nuez de esta técnica reside en la transferencia de moléculas de ADN, separadas por electroferesis en gel, a una membrana de nitrocelulosa o nailon. Se desnaturaliza el ADN antes o durante el proceso de transferencia, instalando el gel en la solución alcalina. Terminada la transferencia, el ADN queda inmovilizado en la membrana. Un ADN radiactivo (la "sonda") que contiene la secuencia de interés se hibrida o forma un anillo con el ADN inmovilizado. La sonda formará anillo (a partir de una doble



hélice) sólo con moléculas de ADN de la membrana que contengan la secuencia de nucleótidos complementaria a la secuencia de la sonda. Se procede a lavar de la membrana la sonda que no ha formado anillo; se expone la membrana lavada a una película de rayos X, que detecta la presencia de radiactividad en la sonda enlazada. Una vez revelado el autoradiograma, las bandas obscuras muestran las posiciones de las secuencias de ADN que se han hibridado con la sonda. Cuando el ARN se somete a electroforesis seguido de formación de híbridos ARN/ADN, la técnica recibe el nombre de transferencia Northern, puesto que se trata de la imagen especular u opuesta de la transferencia Southern. La transferencia de proteínas desde geles de acrilamida hacia membranas de nitrocelulosa se denomina transferencia Western; se realiza usando una corriente eléctrica. (*Genetics,* p. 523.) Para la española: "Una técnica de hibridración muy utilizada en la actualidad es el llamado Southern blot o transferencia de Southern. Esta técnica permite transferir fragmentos de DNA desde un gel, en el que se ha realizado la electroforesis y, desde ahí, continuar la técnica de hibridación. Así se puede realizar la hibridación sobre fragmentos concretos de los previamente separados por electroforesis." (*Genética,* p. 332.)

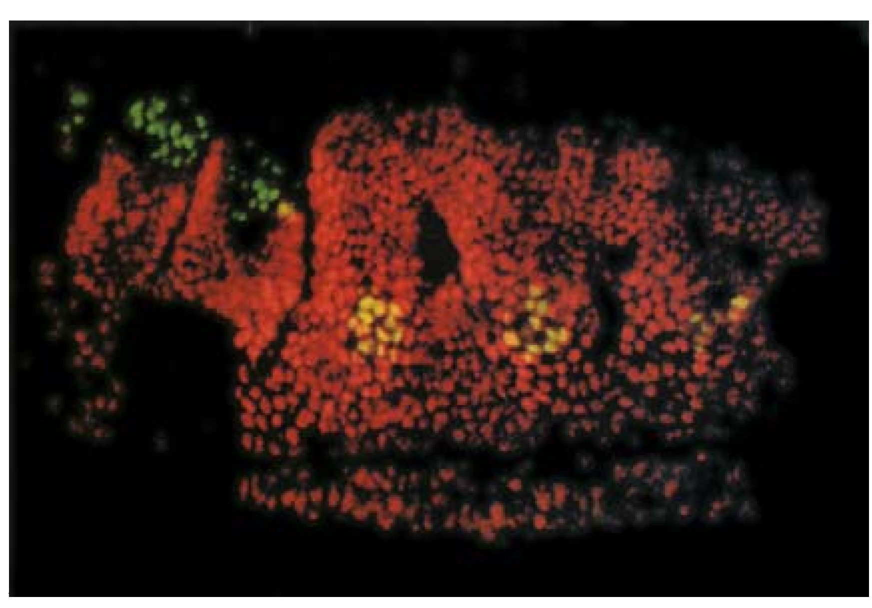
Las primeras noticias relativas a la herencia se remontan hasta el 6000 a.C. Nos hablan del empeño de los babilonios en preservar la pureza de sangre de su yeguada. Desde la ciencia griega, la consideración de los rasgos transmisibles se vincula al origen de la vida, idea que retoma con vigor la Nuova Scienza. En 1630 William Harvey descubre que los animales procedían de un óvulo con participación activa del esperma. Mediado el siglo XIX N. Pringsheim observa la fecundación real en un alga verde (*Vaucheria*). Y en 1875, Oskar Hertwig es testigo de la penetración del espermatozoide en un óvulo de erizo de mar. Así establecida su base citológica, la herencia adquirió estatuto científico con los trabajos de Gregor Johann Mendel sobre guisantes (*Pisum sativum*).

Mendel no fue el primero en realizar experimentos sistemáticos de hibridación con plantas. Le había precedido Kolreuter con *Nicotiana*, entre varios. Pero éstos habían abordado el organismo entero, mientras que el agustino atendió a determinados caracteres en cada ocasión y obtuvo los híbridos, cuya progenie seguía para descubrir su segregación, es decir, la pauta de la herencia. (No se hablaba entonces de genética, voz acuñada en 1901 por William Bateson. La palabra gen la introdujo en 1909 William Johannsen.) Escogió el guisante porque se trataba de una planta anual, presentaba definidos los caracteres y mostraba flores perfectas que podían agruparse en líneas puras. Sin saberlo, acertó al fijarse en siete caracteres que se encontraban en siete cromosomas distintos, en una planta de siete cromosomas haploides, razón por la cual obtuvo un reparto independiente en la generación F_2.

No menos feliz fue la elección del organismo experimental en el gran salto siguiente, el dado por Thomas Hunt Morgan y su equipo de la Universidad de Columbia. Sirviéndose de la mosca de la fruta, desarrollaron técnicas hoy rutinarias en análisis genético, incluidas las cartográficas. El interés se centró luego en los mecanismos de transmisión de los genes y en la actuación de éstos en el control de la altura, el color de los ojos y otros caracteres variables. Mas, si los genes eran entidades físicas, se razonaba, tenían que estar integrados por moléculas. Debían estudiarse, pues, con métodos biofísicos y bioquímicos.

La implicación de los físicos en biología, principal revulsivo de las ciencias de la vida en los años treinta y cuarenta, fue propuesta por Niels Bohr y articulada por Erwin Schrödinger. Bajo esa nueva atmósfera, Max Delbrück inició su trabajo sobre bacteriófagos; pensó que el ciclo de infección de las bacterias por los virus constituía un modelo adecuado para el estudio de los genes. La necesidad de una identificación experimental del material genético se convirtió en urgencia apremiante. Si proteínas y ADN están presentes en los cromosomas, ¿de qué se constituirán los genes? Ostwald Avery, Colin McLeod y Maclyn McCarty aportaron la solución en favor del ADN al poner de manifiesto la naturaleza química del principio transformante en la bacteria *Diplococcus pneumoniae*. Desde que en 1953 Watson y Crick hallaron la estructura en doble hélice no quedó la menor duda de que el ADN era el material hereditario.

Tardaría bastante en aparecer la epigenética, el estudio de los cambios heredables de la expresión génica que se producen sin alterarse la secuencia de ADN. La forma y función de cualquier organismo depende de la regulación de la expresión génica, que exige un control de las pau-



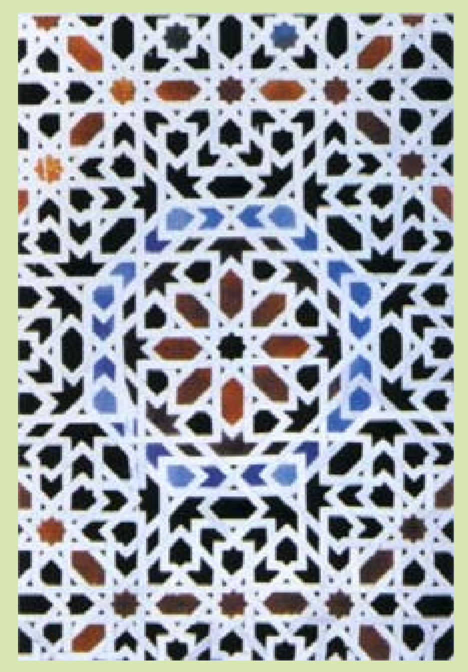
Las fotografías de la portada compendian el contenido de los textos de A.V.S.S. Sambamurty y de M. J. Puertas. El manual indio (izquierda) *está pensado para llevar el conocimiento a la práctica agroalimentaria; el manual español trasciende las exigencias discentes del alumno. Aquel recoge unas mazorcas, éste ofrece una imagen de microscopio confocal de un embrión de* Drosophila melanogaster *doblemente marcado con anticuerpos que reconocen los productos génicos de los genes extradenticle* (rojo) *y Distal-less* (verde)

Retorno a la síntesis

THE SELF-MADE TAPESTRY. PATTERN FORMATION IN NATURE, por Philip Ball. Oxford University Press; 1999.

Uno de los objetivos de la ciencia, en su camino hacia la unificación, es reconocer cómo principios comunes generales operan en fenómenos aparentemente diversos, combinados en función de su naturaleza, tiempo, lugar y escala. La ciencia ha de aclarar la génesis y el significado de las formas naturales, resultando particularmente atractivas las que destacan por su regularidad y complicación, tanto en el tiempo como en el espacio. Es gratificante reconocer, en fenómenos recientemente analizados, a veces con resultados inesperados, la operación de principios muy generales que la ciencia ha ido y va desvelando. Mejor si permiten expresión matemática relativamente sencilla. Entonces la complejidad de la naturaleza se puede ver como resultado de la combinación y operación de varios agentes y factores que, separadamente, parecen sencillos y en sus resultados son analizables, por separado y en combinación.

Esta aproximación pasa por ser más científica que otra más ingenua y fatigosamente descriptiva. Quizá por eso se está produciendo mucha letra escrita sobre relaciones cuantificables de forma, fractales, caos, criticalidad, etc. Se exploran homologías entre fenómenos de manifestación diferente, lo que permite superar aspectos de la tradicional separación entre disciplinas y reconocer mecanismos físicos básicos de operatividad universal. A veces, este reconocimiento puede inquietar, pero a la larga siempre es enriquecedor.



Mosaico de la Madrasat al Bu'nanyyah (Fez), 1350-55

La introducción de este libro es sencilla y sugerente. Usa ejemplos omnipresentes en la naturaleza, concernientes a periodicidades aproximadas, motivos de dibujo más o menos repetitivos, ritmos, etc., en los que se reconoce la operación de principios basados en leyes físicas sencillas, a menudo engendradoras de formas regulares que nos producen placer estético, sea en el tiempo (periodicidades o ritmos), en el espacio (regularidades de dibujo o estructura) o en ambos. O bien que marcan simplemente direcciones o tendencias comunes.

Philip Ball es autor de otro libro excelente, *Designing the Molecular World, Chemistry at the Frontier*, y el presente, hasta cierto punto, es su complemento, centrado en una escala de dimensiones más amplia. El capítulo 1 trata de regularidades estructurales manifiestas en el desarrollo de los organismos. Contiene una merecida y casi obligada referencia al libro *Sobre el crecimiento y la forma* de D'Arcy Thompson. La verdad es que los biólogos no habían prestado suficiente atención a regularidades comunes o paralelas observables en el desarrollo de morfologías, que pasaron con éxito la prueba de la selección natural. Claro que el idealismo, relativamente ingenuo de Thompson, puede chocar tanto con las adaptaciones internas de Lamarck, y la selección natural de Darwin, como con los mecanismos que se van conociendo concernientes a la expresión morfológica de los genes. El libro que comento corresponde a una época presente. Hubiera deseado que hiciera más extensa referencia, probablemente con necesaria reinterpretación unificadora, de los puntos de vista de Volterra, sus predecesores (Maupertuis, Fermat) y sucesores (Feynman), en lo que concierne al desarrollo, evolución y las sucesiones ecológicas de los organismos, desarrollando el concepto de sus "entropías de camino", en relación con tendencias observables en la naturaleza, que contrastan con tipos de cambio más bruscos y catastróficos.

El capítulo 2 trata de regularidades en la ocupación del espacio, desde las pompas de jabón a los esqueletos de unicelulares y a los diversos tipos de mosaicos que cubren diversas necesidades mecánicas y funcionales a todas las escalas de la vida. Resultan atrayentes las estructuras de tamaño microscópico, tema espléndidamente ilustrable por las piezas esqueléticas a todas las escalas, vivientes o fósiles, ampliables con producciones verdaderamente exosomáticas, como las celdillas de los panales de las abejas o los tubos de los tricópteros, y aun ¿por qué no? los habitáculos humanos. Todos plantean problemas equivalentes, cuyas soluciones han de pasar, tarde o temprano, la prueba de la selección natural.

En el tercer capítulo se habla de ondas de todo tipo, incluyendo la expresión espacial de las reacciones químicas, dentro de los organismos y en su entorno.

El capítulo cuarto, con el título de "cuerpos", trata de la apariencia externa, como dibujo y color. En su generación se reconocen mecanismos o principios que sólo aparentemente son simples. El pelaje de los mamíferos, la superficie de las conchas marinas y las alas de las mariposas suministran buenos ejemplos. La explicación

tas espaciales y temporales en la embriogénesis. La impronta genómica nos remite a la expresión génica específica de un progenitor, es decir, a la diferencia en la expresión según cuál de los dos progenitores contribuyó al gen. Dicho de otro modo, debido a la eficacia de los *loci* con impronta, los genomas parentales no son funcionalmente equivalentes. Ese es el campo abarcado en *Genomic Imprinting*.

Los fenómenos de la impronta genómica suelen saltarse las leyes de la herencia mendeliana. De ahí el retraso en admitirla. Añádase que la naturaleza de la programación epigenética es la parte peor enten-

ha de abarcar desde la segmentación embrionaria inicial hasta la determinación final de las manchas o de las escamas coloreadas, sin olvidar la disposición de las hojas y la construcción de las flores. Pero no da por supuesto que las plumas de las aves y los motivos de las alas de las mariposas, y muchos otros elementos de dibujo, son de determinación más digital que difusiva.

En el capítulo 5 aborda las ramificaciones en órganos que rellenan espacios, que pueden compararse con crecimientos inorgánicos de cristales y definen configuraciones (incluyendo dendritas) que admiten una expresión "fractal" o sugieren la comparabilidad con toda suerte de cristalizaciones. Hubiera deseado que las plantas vasculares merecieran mayor atención. Creo que se descuida demasiado esta oportunidad muy instructiva de ahondar un poco más en la naturaleza del árbol, como construcción que enlaza dos interfases en sus respectivos extremos: la que está en el suelo, emparejado con el agua, y la de la atmósfera, unida directamente con la luz y el aire.



Ciprés ahogado por un helecho trepador

El capítulo 6, "breakdowns", corresponde a lo que podemos llamar acontecimientos catastróficos y estructuras de desguace: cristales que se rompen, el barro cuarteado en el fondo de un embalse que se deseca, perfiles de desgarrones, meandros fluviales, fenómenos de percolación, rayos, perfiles o contornos de costas y montañas, dan para mucho, sin necesidad de meterse con los montones de arena y las dunas del desierto, ni con la naturaleza fractal de las costas, que se alarga a ojos vista al aumentar el ajuste de la vara de medir con segmentos, supuestos rectilíneos, cada vez menores. Quizá se eche en falta una mayor consideración de la dinámica de los meandros, del juego entre la selva y el río, con su poder de conservación, renovación y evolución. Que corresponde a la misma dinámica de la renovación de las ciudades, cuando se derriban en bloque barrios antiguos en los que se aglomeraban construcciones heterogéneas, para edificar en su lugar nuevos edificios más normalizados y homogéneos desde el principio.

El capítulo 7, titulado simplemente "fluidos", trata de los problemas nunca sencillos asociados principalmente con la turbulencia, manifiesta en toda clase de fluidos, y que aparecen en aspectos tan fundamentales para nuestra vida como son los estados del tiempo, con la lluvia benéfica y la fertilización de los mares, sin olvidar la navegación a vela, inspiración de oceanógrafos.

Cuando lo que tiende a comportarse como fluido consiste en partículas sólidas, mayores y sueltas, tenemos el material granular (capítulo 8), con un buen repaso de los problemas concernientes a dunas, desiertos y avalanchas de nieve. En época reciente el comportamiento de los montones de arena ha servido de vehículo al concepto de criticalidad auto-organizada, que se puede extender a sistemas desde puramente físicos hasta otros mejor calificables como de tipo político o económico.

Con el capítulo 9, "comunidades", entramos en un tema fundamental de la ecología. La exposición de los ejemplos y modelos escogidos es clara y correcta, pero quedan muchos otros aspectos que se podrían proponer de manera más críticamente cuantitativa y en más estrecha relación con principios físicos. Dedica mucho espacio al tema de las fluctuaciones que resultan de la interacción entre poblaciones de un depredador y de una presa que no evolucionan, es decir, siguiendo más a Lotka, con sus limitaciones, que a Volterra, con su intuición más universal, aquí de la inevitabilidad de la selección evolutiva.

El capítulo 10 se titula "Principios" y resulta grato encontrar como encabezamiento una frase de Feynman ("La naturaleza usa solamente los hilos más largos para tejer sus motivos (*patterns*), de manera que cada trocito de su tejido revela la organización del tapiz entero"). También son prudentes los recursos al caos. En su límite suelen ocurrir "cosas", más o menos interesantes, por supuesto. También es éste el lugar escogido para hacer algunas consideraciones generales relativas a la termodinámica, estructuras disipativas, etc.

En estas últimas décadas han proliferado libros en los que se examinaban los aspectos de las creaciones de la naturaleza en relación con teorías o aproximaciones, generalmente de tipo matemático, en sus sucesivos auges momentáneos. Así han ido proliferando los libros sobre caos, fractalidad, teoría de las catástrofes, criticalidad, etc. Ahora empieza a comprenderse que ninguna de las aproximaciones parciales puede dar razón de la real complejidad del mundo y me parece que este libro está ya en la vía de retorno y quizás anticipa el redescubrimiento del entusiasmo por nuevas síntesis.

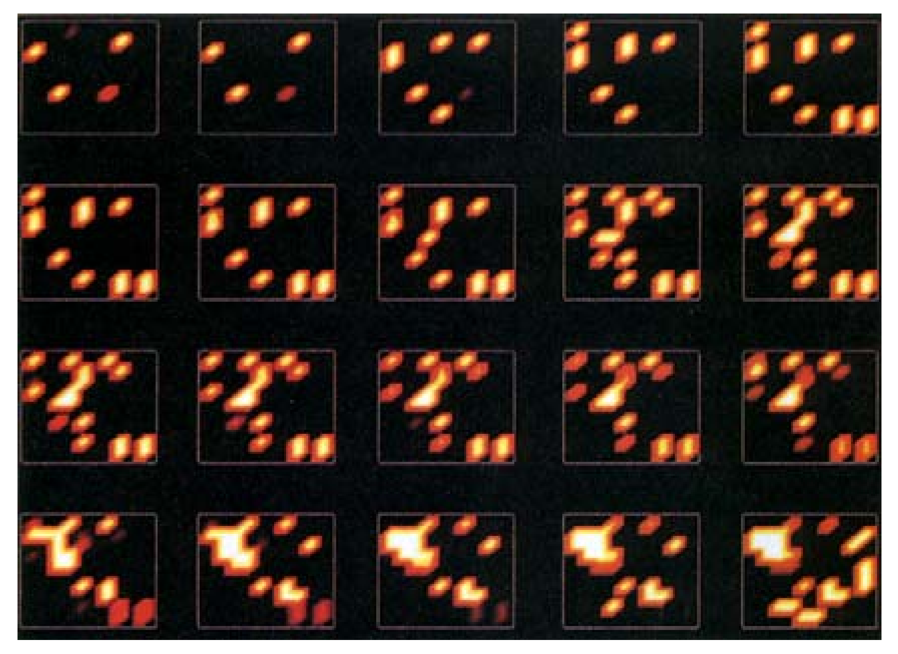
Después de reconocer sus manifestaciones polifacéticas vamos a poner otra vez un poco de misterio en el organismo, tratar de encontrar algún aspecto de su unicidad, si es que la tiene, por lo menos como centro de información copiable y, por tanto, sujeto de selección y, por consiguiente, de evolución.

RAMÓN MARGALEF

dida del control de la expresión génica.

Cuando hablamos de impronta, pensamos casi siempre en los mamíferos. Nada tienen que envidiarles las angiospermas. Con una notable diferencia. En los mamíferos se requiere la contribución estricta de ambos progenitores, exigencia que se ahorran muchos embriones de plantas con flores. En las angiospermas se da una doble fecundación para obtener dos productos, el cigoto diploide y el endosperma primario triploide.

La capacidad de expresarse en razón del origen progenitor encierra un interés más que mediano para conocer



Simulación de una red bidimensional de neuronas corticales

el grado génico de parentesco con los padres. Hasta el punto de que en la médula de la concepción de la impronta tiene su asiento la así llamada teoría del parentesco, propuesta y elaborada por David Haig.

Ciñéndonos al hombre, sabido es que, merced a la explosión de la bioquímica y la genética, emerge, a caballo entre las postrimerías de los años sesenta y comienzos de los setenta, un nuevo cuadro de la biología humana en su doble estado normal y patológico. Con su progreso, la genética molecular ha renovado el estudio de la evolución humana (ábrase *Human Gene Evolution*) y se prepara para dar un giro copernicano en el remedio *a radice* de las enfermedades, según plantean *Gene Therapy. Principles and Applications* y *The Development of Human Gene Therapy*.

El genoma haploide humano comprende 23 cromosomas, que encierran unos $3,2 \times 10^9$ pares de bases de ADN. Muchas de ellas redundantes y sin función conocida. Para activar la transcripción de un gen, para permitir que la enzima polimerasa de ARN inicie la síntesis de ARNm, el cromosoma, densamente apretado, tiene que desplegarse. Al abrirse, deja ver los sitios de unión del ADN a las proteínas activadoras.

Mediante la comparación de secuencias de ADN de las poblaciones actuales se infieren la evolución y los procesos migratorios del pasado. Así se ha investigado la trayectoria de los humanos modernos en su salida de Africa. En concreto se determinaron los genotipos en 95 alelos de centenares de individuos pertenecientes a 26 poblaciones europeas. Rastreando frecuencias alélicas se ha rehecho el camino recorrido por los agricultores del Neolítico desde Oriente Medio.

Pero la mayor parte de la variabilidad genética es anterior a la salida de los humanos de Africa. El 84 por ciento de la diversidad genética es la que se da entre individuos de una misma población, el restante 16 por ciento pudiera atribuirse a la distinción entre poblaciones. En comparación con los grandes primates, el alcance de la variabilidad genética mostrada por los humanos modernos es muy pequeña. Carece de fundamento genético la clasificación racial. Los rasgos estereotípicos del color de la piel, textura del pelo y demás son superficiales, explicables por una selección diferencial promovida por el clima.

Las herramientas de la genética molecular aportaron el medio para aislar, clonar y caracterizar genes vinculados con enfermedades. Entre los primeros figuró el gen de la betaglobina humana, cuya deficiencia provoca la anemia falciforme y la talasemia. Pero se ha atemperado la euforia inicial de una pronta terapia génica, o transferencia intencionada de ADN con fines curativos. Por una poderosa razón: está costando muchísimo dar con el vector idóneo, selectivo y estable, que no provoque ningún daño colateral por mutación.

Cierto es que la esperanza se asentaba en pilares sólidos. En 1981 aparecieron los primeros retrovirus, vectores modificados por ingeniería genética que permitían introducir formas potencialmente terapéuticas de genes silvestres en células de mamíferos para corregir los defectos causados por mutantes génicos.

Pero dos intentos tempranos fracasaron con sendos enfermos de talasemia. Mayor fortuna corrió, en 1990, una joven paciente afectada de una grave inmunodeficiencia combinada. Se le extrajeron células de la médula ósea y se le transfirieron *ex vivo* con un vector retrovírico que portaba una copia de ADNc del gen de la deaminasa de adenosina (ADA). La enzima ADA convierte la desoxiadenosina en sus metabolitos. En ausencia de la enzima, se acumula desoxiadenosina, que es tóxica para los linfocitos T. Puesto que de estas células depende el buen funcionamiento del sistema inmunitario, la deficiencia en ADA resulta letal. Pero la expresión del gen transducido de ADA era sólo efímera. La talasemia —alteración del sistema regulador de la transcripción de las cadenas globínicas de la hemoglobina— trascendía, entonces y ahora, las posibilidades de la terapia génica.

Para que una enfermedad sea un objetivo claro de la terapia génica tiene que reunir un rosario exigente de condiciones: riesgo de letalidad, clonación del gen, viabilidad de la transferencia génica al tejido pertinente, regulación plástica del gen, procesamiento de la proteína buscada, correcta localización subcelular de la proteína, persistencia de la expresión génica para evitar la dosificación repetida y reversibilidad de la enfermedad.

Hay en marcha unos 200 ensayos clínicos que cuentan con la participación de unos 2500 pacientes de un amplio espectro de enfermedades: fibrosis quística, hemofilia, diabetes, cáncer, sida, deficiencias inmunitarias, desórdenes metabólicos, cardiopatías isquémicas y artritis.

La fibrosis quística, una alteración caracterizada por una mucosidad pegajosa de los pulmones, páncreas e hígado, está causada por una mutación en el gen *CFTR*. La proteína por éste determinada bombea ion cloruro fuera de las células. El defecto génico suele conducir a un fallo respiratorio. Una mejora en la nutrición, suplementos de enzimas pancreáticas, fisioterapia y antibióticos han alargado la esperanza de vida de menos

de 10 años en 1960 hasta una media de 28 en 1991. Pero la solución sería la terapia génica. Se han ensayado ya dos estrategias: recurrir a un adenovirus vector que se insiriera en las células epiteliales del árbol broncoalveolar y servirse de liposomas catiónicos, dotados de carga positiva y capaces, por ende, de enlazarse con el ADN, dotado de carga negativa, en su superficie.

El problema principal para un tratamiento eficaz de pacientes con tumores sólidos estriba en la similaridad entre las células malignas y las normales. Además, cualquier célula tumoral que se hurte a la terapia puede formar clones. La cirugía y la radioterapia, terapias locales, pueden alcanzar cierto éxito, pero sólo si las células malignas están confinadas a la zona tratada. Aunque existen muchos fármacos citotóxicos, sólo una pequeña proporción de pacientes se han curado. Los éxitos obtenidos con la enfermedad de Hodgkin, linfoma de no-Hodgkin, leucemia infantil, coriocarcinoma y tumores de las células germinales no se han materializado en el cáncer de pulmón, mama o colon.

En principio, la inactivación de las células tumorales mediante transferencia génica puede realizarse por la vía interpuesta del sistema inmunitario o por vía directa a través de genes citotóxicos. Se ha demostrado *in vitro* que la retrorregulación de la expresión anormal de los oncogenes revierte el fenotipo maligno de varias líneas tumorales. Se trata de "anti-genes" que silencian la producción de la proteína anormal. Y se piensa en usar ribozimas que rompan determinadas secuencias de ARN.

Los vectores víricos (retrovirus, adenovirus y asociados) han constituido los medios predominantes de inserción de genes en protocolos clínicos. En estos estudios la seguridad ha quedado corroborada, incluso en la inserción directa de vectores adenovíricos, así como en la aplicación de líneas celulares del productor retrovírico en el cerebro para la transferencia *in vivo*. De ese modo, aunque lenta, la calzada que lleva a la terapia génica se va empedrando.

Desde muy pronto se quiso forzar el linde de la genética y abrirlo a ámbitos espurios. Bajo una pretendida eugenesia subyacía una ideología política cuyos efectos devastadores no han desaparecido. En última instancia esa tendencia bebía en la explicación haeckeliana de la vida y el mundo, objeto de disección en *Haeckel's Monism and the Birth of Fascist Ideology*. Se defiende en este libro que el fascismo no nació de un sistema económico determinado, ni derivó siquiera de un darwinismo social y elitista, sino que su desarrollo fue consecuencia de la transformación directa y específica de un sistema científico, de amplio calado popular, en una ideología política, filosófica y religiosa que —en combinación con otras tradiciones antiliberales y antirracionales— adquirió una dimensión dogmática. La ideología en cuestión era la ciencia y la filosofía monista y evolutiva del zoólogo alemán Ernst Haeckel (1834-1919).

El monismo haeckeliano desempeñó un papel determinante en el nacionalsocialismo alemán y en el ideario de los nacionalismos y fascismos europeos. Incluso en aquellos casos en que parece que el fascismo y el nacionalismo se levantan contra las ideas positivistas de Haeckel, las críticas son más epidérmicas que sustantivas. Los archivos recién abiertos de la *Haeckel Haus* en la Universidad de Jena contienen ejemplos de cartas entre el zoólogo e importantes personalidades que contribuyeron de una forma decisiva a la formación de esas ideologías y actitudes. No fue España una excepción desde la entregada adhesión del catedrático valenciano Pelegrín Casanova.

El monismo de Haeckel, de resonancias antiguas, defendía la unidad fundamental de materia y espíritu, así como la unicidad de lo orgánico y lo inorgánico. Proponía que la teoría evolucionista debía constituir no sólo el fundamento de la biología, sino también portar la solución de los problemas de la ciencia, de la historia y de las instituciones sociales. Para Haeckel había en la materia unas fuerzas que dinamizaban la evolución, tesis que le aproximaba a Lamarck, cuyas ideas sobre la generación espontánea y la herencia de los caracteres adquiridos siempre retuvo.

Sin saltar a la arena política hubo haeckelianos que profundizaron en las tesis positivistas del maestro dentro de las paredes del laboratorio. Con esa perspectiva hay que leer *Die Geschichte der genetisch orientierten Hirnforschung von Cécile und Oskar Vogt in der Zeit von 1895 bis ca. 1927*.

Cécile Mugnier, cinco años más joven que su marido Oskar Vogt, nació en 1875 en Annecy, en la Saboya francesa. Perdió a su padre, cuando tenía dos años. Su madre, librepensadora ("unabhängige Denkerin"), había abandonado la Iglesia Católica. Terminado el bachillerato, se matriculó en la facultad de medicina de la Universidad de París, cuya escuela clínica era punto de referencia de la ciencia del siglo XIX y combinaba la estadística médica con la sección postmortem. Cécile sobresalió en el estudio de la neurología, que enseñaba Pierre Marie, neurólogo del frenopático de Bicêtre y discípulo de Paul Broca, además de estrecho colaborador de Jean Martin Charcot.

En 1870 nació Oskar Vogt en la alemana Husum. Desde niño sintió inclinación por las ciencias naturales, y fue en el colegio donde realizó sus primeras preparaciones microscópicas de diatomeas recogidas en el mar del Norte. Pero su mentor, el sociólogo Ferdinand Tönnies, le despertó el interés por la psicología y la psiquiatría, en un momento en que eran cuestiones debatidas las influencias del medio familiar en la degeneración de los individuos y el papel determinante de la selección. Al entrar en la universidad, optó por la carrera de medicina. En Kiel estudió anatomía con Walther Flemming. Pasó a Jena, donde tuvo por maestros a Max Fürbringer y Haeckel. Oskar mostró un aprovechamiento sobresaliente en citología e histología. Se doctoró con una disertación neurológica sobre el *corpus callosum*.

La cartografía neuroanatómica del cerebro de los humanos y los mamíferos no comienza con los Vogt, pero ellos se esforzaron por apuntalarla en la genética y evolución. Y, en el más estricto haeckelianismo, buscaron las bases materiales de los procesos de la consciencia en los numerosos experimentos de vivisección con mamíferos superiores. Admitieron la teoría de la neurona como unidad fundamental y su actividad a través de potenciales de acción. En su interpretación de las observaciones conjugaban la tesis evolutiva, con la variabilidad hereditaria, sistemática zoológica, psicología y psiquiatría, citología y bioquímica. De manera muy especial, la neurología era para ellos una convergencia de la reflexofisiología y doctrina genética. Resume su pensamiento de madurez el tema que esbozaron para su colaboración en el homenaje que la Junta dedicó a Cajal en 1922: sobre alteraciones arquitectónicas causales de las enfermedades mentales como casos de la variación normal de las especies.

LUIS ALONSO

IDEAS APLICADAS

Kenneth H. Burrell
American Dental Association

Dentífricos

Para limpiarse los dientes, los griegos y romanos de la Antigüedad clásica empleaban, entre otros, piedra pómez, huesos pulidos, conchas de ostra y cáscaras de huevo, combinados con mirra u otras sustancias que actuaban de astringentes. Los dentífricos modernos, con sus sabores refrescantes e ingredientes invasores de las cavidades, conservan las funciones de las antiguas pastas prototípicas, pero a ellas se agregan detergentes para reforzar la limpieza y agentes terapéuticos que preservan la salud de dientes y encías.

1. LOS ABRASIVOS siguen siendo los componentes principales de los dentífricos. La mayoría de las pastas de dientes contienen partículas de sílice hidratada suavemente abrasivas, que miden de cuatro a doce micras de diámetro. Puede haber también carbonato cálcico, fosfato bicálcico y trihidrato de alúmina. El índice de abrasividad es crítico: el dentífrico debe ser lo bastante abrasivo para facilitar la remoción de las manchas y la placa dentaria sin dañar las piezas.

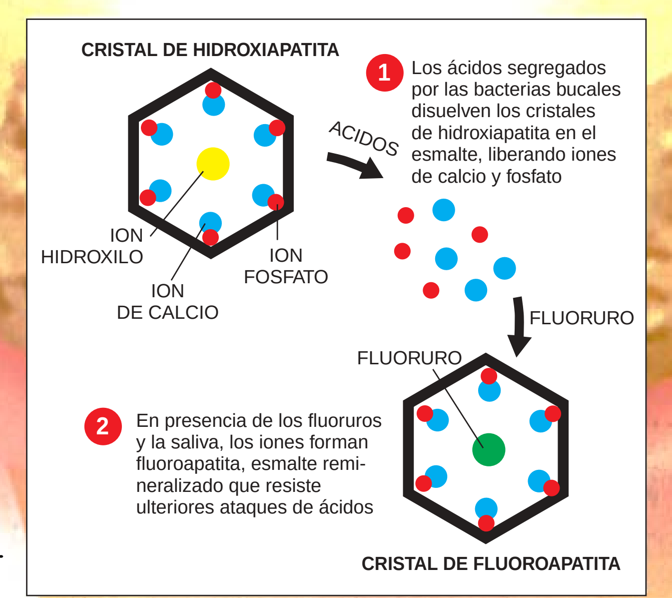
ABRASIVO

RESTOS DE COMIDA

DETERGENTE

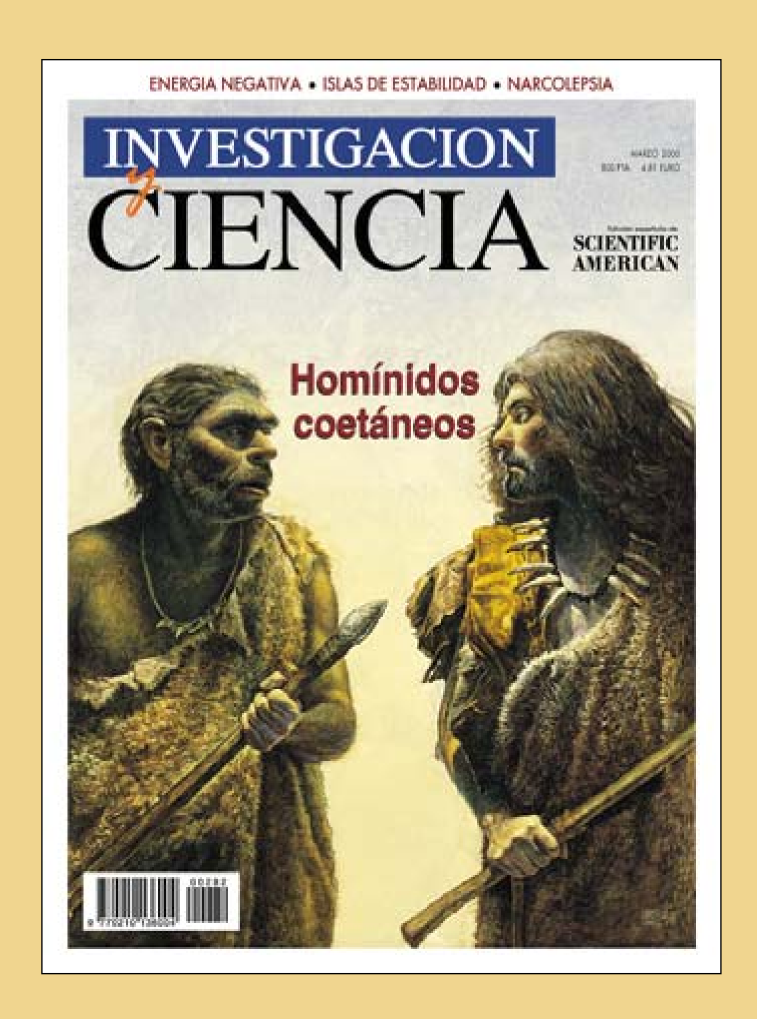
2. LOS DETERGENTES por lo común laurilsulfato sódico, cumplen la función de espumantes. Reblandecen los restos de comida y otros, con lo que facilitan el movimiento del abrasivo por dientes y encías.

CAVIDAD



3. AGENTES TERAPEUTICOS son los fluoruros. Mantienen sanos los dientes y los tejidos blandos del aparato bucal. Los dentífricos suelen contener tres fluoruros (fluoruro sódico, monofluorofosfato sódico y fluoruro estannoso) para combatir la caries (degradación dentaria). En el proceso de desmineralización, los ácidos que producen las bacterias de la boca disuelven el esmalte, pero los fluoruros propician la inversión de ese proceso. La saliva actúa de depósito de calcio y fosfato, que combinadamente con los fluoruros, remineralizan el esmalte (*1, 2*).

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



ENERGIA NEGATIVA, AGUJEROS DE GUSANO Y PROPULSION A DISTORSION, por Lawrence H. Ford y Thomas A. Roman

La creación de agujeros de gusano y de la propulsión a distorsión ("warp drive") requeriría de una forma insólita de energía. Pero las mismas leyes que permiten la existencia de esta "energía negativa" parecen también limitar su comportamiento.

CUANDO NO ESTABAMOS SOLOS, por Ian Tattersall

Hoy en día, damos por supuesto que Homo sapiens *es el único homínido sobre la Tierra. Pero durante los últimos cuatro millones de años diferentes especies de homínidos compartieron el planeta con nosotros. ¿En qué nos separamos?*

VIAJE A LA ISLA SUPERPESADA, por Yuri Ts. Oganessian, Vladimir K. Utyonkov y Kenton J. Moody

La síntesis del elemento 114 confirmó las predicciones teóricas, conocidas desde hace muchos años, de que en el mar de los efímeros núcleos superpesados había una isla de estabilidad.

LA DESATENDIDA NECESIDAD DE PLANIFICACION FAMILIAR, por Malcolm Potts

En muchos países, hombres y mujeres carecen todavía de un adecuado acceso a los anticonceptivos. Como no se les dé la opción de controlar su fertilidad, en el próximo siglo habrá graves problemas ambientales y sanitarios en muchas partes del mundo.

LA TIERRA, UNA BOLA DE NIEVE, por Paul F. Hoffman y Daniel P. Schrag

Los hielos cubrieron nuestro planeta hace cientos de millones de años. En la ola de calor subsiguiente, provocada por el efecto de invernadero, aparecieron organismos más complejos.

NARCOLEPSIA, por Jerome M. Siegel

Pese a los signos evidentes que la delatan, la narcolepsia sigue siendo una enfermedad harto desconocida. Sin embargo, alguna nueva luz se divisa en el horizonte inmediato.

BIOLOGIA DE LAS CHAPERONINAS, por José María Valpuesta, Oscar Llorca y Sergio Marco

Muchas proteínas son incapaces por sí solas de alcanzar su conformación nativa. Las chaperoninas son unos complejos proteicos que facilitan el plegamiento adecuado de aquéllas.

MAGLEV: UN NOVEDOSO ENFOQUE, por Richard F. Post

El Inductrack promete ser un sistema más seguro y económico para trenes de levitación magnética. Su base técnica puede también aplicarse al lanzamiento de cohetes.

